

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

I.T. Telecomunicación (Sonido e Imagen)



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

**Caracterización experimental in situ de la atenuación
de las barreras acústicas basadas en Cristales de
Sonido.**

Aplicación de la Especificación Técnica CEN/TS 1793-5

TRABAJO FINAL DE CARRERA

Autor/es:

Silvia Núñez Ferriol

Director/es:

*D. Joan Martínez Mora
D. Vicent Romero García*

GANDIA, 2013

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL IN SITU DE LA ATENUACIÓN DE LAS BARRERAS ACÚSTICAS BASADAS EN CRISTALES DE SONIDO. APLICACIÓN DE LA ESPECIFICACIÓN TÉCNICA CEN/TS 1793-5

ÍNDICE:

1. INTRODUCCIÓN

- 1.1. Antecedentes y Objetivos
- 1.2. Objetivos
- 1.3. Estructura proyecto final de carrera

2. CONCEPTOS BÁSICOS:

- 2.1 Principios físicos básicos
- 2.2. Cristales de sonido
 - 2.2.1. Ley de Bragg y Band Gaps
 - 2.2.2. Fenómenos adicionales: Resonancias y Absorción.
 - Resonancias: Resonadores Hemholtz
 - Absorción: Materiales porosos (lana de roca)
- 2.3. Estructura a analizar
 - 2.3.1. Características generales y emplazamiento.
 - 2.3.2. Descripción de la estructura
- 2.4. Descripción de la normativa
 - 2.4.1. Parámetros
 - 2.4.2. Definición del índice aislamiento acústico (SI)

3. DISEÑO EXPERIMENTAL

- 3.1. Instrumentación
- 3.2. Aplicación de la normativa en nuestro trabajo

4. RESULTADOS

- 4.1. Descripción de las medidas
- 4.2. Respuesta con barrera
- 4.3. Respuesta sin barrera
- 4.4. Índice aislamiento acústico (SI)

5. CONCLUSIONES

6. REFERENCIAS

1.INTRODUCCIÓN:

1. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS:

Durante los últimos años el desarrollo, control y conocimiento de la contaminación acústica ha aumentado notablemente debido a los diversos estudios de investigación que se están desarrollando en la actualidad [1,2] y a la promulgación de normativa tanto europea como nacional [3,4,5].

Uno de los elementos de atenuación más eficientes referente a la contaminación acústica ambiental son las barreras acústicas [6].

Este proyecto parte de la necesidad de evaluar las características intrínsecas de una barrera acústica, con la peculiaridad de estar basada en Cristales de Sonido [1]. Estos sistemas contienen propiedades acústicas aplicables a la contaminación acústica. Los cristales de sonido son sistemas conformados por dispersores con una distribución periódica, con propiedades físicas muy interesantes, las cuales, han sido estudiadas en los últimos años [1,2,7], tanto teórica como experimentalmente. Además, la atenuación que proporcionan puede mejorarse al añadir resonadores, absorbentes acústicos, e incluir dispersores con diferentes formas geométricas y diferentes posiciones de los mismos.

Se procede a evaluar experimentalmente la atenuación que produce una barrera de este tipo siguiendo la metodología planteada en el Standard Británico CEN/TS 1793-5:2003 [3]. El estudio experimental que se plantea en esta normativa se realiza *in situ*, es decir, en el lugar donde ha sido situada la barrera acústica para reducir el ruido. La metodología propuesta se encuentra en diversos estudios científicos [2,7], que han llegado a la misma conclusión: aplicar el método de Adrienne mediante la especificación técnica CEN/TS 1793-5.

1.2 LOS OBJETIVOS

Los objetivos marcados para este trabajo son los siguientes:

- Aplicar la especificación técnica CEN/TS 1793-5 para la evaluación in situ de las propiedades de atenuación acústica de las barreras acústicas basadas en Cristales de sonido.
- Recopilar y aplicar la normativa al respecto así como analizar la normativa en estudio actual.

- Estudiar el comportamiento de las barreras de sonido basadas en los Cristales de Sonido con distintos elementos y/o dispersores.
- Comparar los resultados obtenidos en las medidas experimentales realizadas en cristales de sonido con el comportamiento de las barreras clásicas.

CONCEPTOS BÁSICOS:

2.1 PRINCIPIOS FÍSICOS BÁSICOS

De una manera física, el sonido se puede definir como una variación de presión que el oído humano es capaz de detectar y que puede ser descrito por diversos parámetros, principalmente por la presión acústica y la frecuencia.

El sonido tiene su origen en las vibraciones mecánicas de la materia, tanto en el estado sólido, líquido o gaseoso, se propagan en forma de ondas longitudinales y transversales de presión sonora en todas direcciones. Se trata, pues, de movimientos ondulatorios producidos por una aportación de energía mecánica que produce vibración en un medio físico, y que se transmite en todas direcciones a través del aire (ondas longitudinales) y de otros medios elásticos (ondas longitudinales y transversales).

El proceso de generación de tales ondas sonoras tiene su origen, por lo general, en un objeto en vibración que arrastra las partículas de aire en contacto con el mismo, produciendo de forma alternativa depresiones y sobrepresiones que se van extendiendo a las capas de aire contiguas, dando como resultado una onda de presión que se propaga de manera ondulatoria desde el objeto en vibración. Las ondas sonoras se caracterizan por la amplitud de los cambios de presión, por su frecuencia, por la velocidad de propagación y variación en el tiempo.

Se percibe el sonido cuando la onda de presión penetra por el pabellón auditivo y hace vibrar la membrana del tímpano. Esta vibración se transmite al oído medio y de éste al interno, excitando los terminales del nervio acústico que transporta al cerebro los impulsos neuronales que generan la sensación sonora.

Un sonido puro se caracteriza físicamente por la frecuencia y amplitud de las variaciones de presión acústica. A estas magnitudes físicas corresponden sensaciones distintas: el tono o sensación de agudeza (propia de la frecuencia), la sonoridad o sensación de intensidad (propia de la presión acústica).

El oído humano es uno de los órganos del cuerpo más intrincados y delicados. Es capaz de responder sobre un intervalo de aproximadamente 20 Hz a 20 KHz. Es un receptor sensible de banda ancha. En conjunto con el sistema nervioso, actúa como un analizador de frecuencia de selectividad envidiable.

Mencionamos algunas de las propiedades fundamentales del oído humano, como sería el umbral de audibilidad, definido como, el nivel mínimo perceptible de intensidad en

campo libre de un tono que se puede destacar a cada frecuencia sobre toda la gama del oído.

Ahora bien, el sonido que capta nuestro oído rara vez será puro, debido a la presencia de ruido. El ruido, es pues, una perturbación que interfiere en lo que oímos, suele corresponder a una variación aleatoria de la presión acústica. Según diversos factores, será menor o mayor la perturbación que nos genere para nuestro sentido auditivo.

En numerosas ocasiones se quiere escuchar un sonido concreto y es enmascarado por un ruido y/o conjunto que dificultan la escucha del sonido de interés. Por lo que, existe una dificultad para oír y entender el lenguaje en presencia de ruido. Éste enmascaramiento, será de mayor o menor grado dependiendo del nivel de umbral de audibilidad de la señal en presencia de ruido.

Sin ser conscientes con frecuencia, oímos, además de convivir con fuentes que generan ruido. Este hecho, puede ser nocivo para nuestra salud. Vivimos en una sociedad donde la contaminación acústica es un factor medioambiental cuyo interés ha ido aumentando conforme se ha ido evolucionando. Nace del proceso pos industrialización, que generó numerosos avances, cambios en diferentes contextos, además de alterar los valores en la sociedad.

El auge de la innovación junto con el cuidado del medio ambiente, no ha ido ligado hasta hace poco, por lo que ha conllevado a la toma de decisiones de los poderes públicos respecto a la problemática que suscita la contaminación acústica, reglando normativa para paliar el exceso de polución acústica que afecta a la población.

Numerosos estudios promovidos por el aumento de las molestias generadas por el ruido en la sociedad [8,9], han evaluado la relación existente entre el nivel de exposición al ruido y el grado de molestia que genera, teniendo en cuenta las horas de exposición, las interferencias en la ejecución de las actividades, etc. Concluyendo que se han de analizar tanto los factores fisiológicos como los factores psicológicos en las personas.

- Los factores fisiológicos: refieren a la intensidad sonora que produce la fuente de emisión, la frecuencia a la que emite, la intermitencia del ruido si es continuo o no molesta con mayor o menor grado, la fuente de ruido cuando emite si de día o de noche.
- Los factores psicológicos: refieren a cada persona, es decir, al estado de ánimo, actitud hacia la fuente sonora (nos afectará mayor o menor grado), la sensibilidad, la personalidad, la edad, entre otros.

El ejemplo de contaminación acústica ambiental más común que se puede encontrar en un núcleo urbano, sería el provocado por el tráfico de vehículos. Normalmente, no se aprecia que en masificaciones de tráfico existe además de un exceso de polución de CO₂, exceso de ruido ambiental, que deteriora la calidad de vida.

Según estudios realizados por el Instituto de ruido de Londres, la energía sonora total emitida a la atmosfera tiene su origen en:

- Automóviles: 80%
- Ferrocarril 4%
- Industria 10%
- Varios (construcción, aeropuertos, etc.) 6%

La propagación del sonido en áreas urbanas es un proceso complejo que depende de diversos factores. Para conocer en cualquier punto el nivel sonoro producido por una fuente acústica situada en una cierta distancia de dicho punto, es necesario tener en cuenta entre otros, los siguientes factores:

- La divergencia de las ondas sonoras.
- La absorción atmosférica.
- La acción del viento y la temperatura.
- La atenuación causada por obstáculos naturales y obstáculos artificiales.

En Mayo de 1992, en el seno de la Comunidad Europea, se estableció el V Programa de Acción en relación con el Medio Ambiente y el Desarrollo Sostenible en la Unión Europea “hacia un desarrollo sostenible”, en el que se establecieron unos límites para frenar la contaminación acústica. Los objetivos alcanzados fueron los siguientes:

- Impedir que la población estuviese expuesta a niveles de ruido superiores a 65 dB(A) y que en ningún momento se superasen los 85 dB(A).
- La población de las ciudades que ya estuviese expuesta a niveles comprendidos entre 55 y 65 dB(A), no debería verse afectada por niveles superiores.
- La población expuesta a niveles inferiores a 55 dB(A), no debería verse afectada por niveles superiores.

Tras el Programa de Acción y la presentación del Libro Verde (visión política futura de la lucha contra el ruido en 1997), estimuló un debate político fruto del cual el 25 de Junio de 2002 se promulgó la Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y Consejo, sobre la evaluación y gestión del ruido ambiental.

La Directiva se basa en clasificar y comprender los problemas causados por el ruido procedente de diversas fuentes para contrarrestar con medidas paliativas. Se establecen indicadores armonizados para medir las molestias causadas por el mismo durante el día (L_{DEN}) y las perturbaciones del sueño (L_{NIGHT}), así como métodos de evaluación, también armonizados. Los estados miembros podrán establecer valores límite para dichos indicadores. A través, de los indicadores se elaborarán mapas de ruido, aportando información esencial para la confección de planes de acción y estrategias, con el fin de prevenir o evaluar la exposición al ruido en todos los niveles: local, nacional y comunitario.

Las siguientes normas que se van a citar son Normas Europeas aprobadas por el comité CEN (comité Europeo de Normalización), compuesto por miembros de órganos nacionales de normalización de un conjunto de países entre ellos: Alemania, Austria, Bélgica, España, Francia, Noruega, Reino Unido, entre otros.

Los miembros CEN están sometidos al Reglamento interior de CEN/CENELEC que define las condiciones de las que debe adoptarse, sin modificación la Normativa Europea como la normativa nacional.

La normativa referente a la temática de este trabajo es la siguiente:

Acústica: evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción Parte 1, aislamiento a ruido aéreo (ISO 717-1:1996).

Los métodos de medición del aislamiento a ruido aéreo de los elementos de construcción y de edificios han sido normalizados en las Normas Internacionales ISO 140-3 , ISO 140-4, ISO 140-5, ISO 140-9, e ISO 140-10. El objetivo de la parte ISO 717 es normalizar el método por el que la dependencia frecuencial del aislamiento al ruido aéreo pueda convertirse en un solo número que caracterice las propiedades acústicas.

También, destacar la siguiente normativa, que tendrá un papel fundamental en el desarrollo del presente trabajo, debido a que la Normativa que vamos a aplicar en el trabajo, tiene mucha relevancia con ésta:

EN 1793-2, Road traffic noise reducing devices-Test method for determining the acoustic performance-.

Durante los años 70 en países de la UE, establecieron como objetivo limitar el nivel de emisión desde fábrica, por tipo y categoría del vehículo, haciendo obligatorio el control de su emisión en las distintas inspecciones técnicas que sufriera el vehículo. De este

modo se redujo los niveles de emisión entre 2 y 3 dB (A) en automóviles y 7 dB(A) en autobuses.

Además del control de emisión de los vehículos hay que tener en cuenta el factor viario, haciendo que el tráfico sea más fluido. Por tanto, se han de reducir los procesos de frenado y aceleración; ya que, provoca mayor de emisión de ruido.

El tipo de calzada también influye, aunque el ruido generado por el tráfico rodado hasta velocidades de 50 a 60 km/h es fundamentalmente, el que origina el motor. A pesar de las medidas, una vía siempre será una fuente de ruido, por lo que conviene alejar de la misma los espacios que requieran mayor silencio mediante una adecuada planificación. Cabe mencionar que una mejora sobre los vehículos sólo permite una reducción global de 5 dB(A), mientras que, una adecuada planificación puede llegar a valores comprendidos entre 15 a 30 dB(A).

El ruido generado por el tráfico ferroviario se produce fundamentalmente en la rodadura, interacción de las ruedas con los raíles. Las medidas encaminadas a reducir este ruido se dirigen a evitar las juntas entre raíles, así como la utilización de carcasas que protejan las ruedas y eviten la propagación de este ruido. Se debe evitar el empleo de señales acústicas.

Como medida correctora, con el fin de reducir el nivel de ruido que emiten los medios de transporte: vehículos, trenes se emplean, por ejemplo, las pantallas acústicas.

Las pantallas son un elemento que proporciona una atenuación del sonido al interponerse en el camino de la onda sonora entre la fuente y el receptor (ver figura 1):

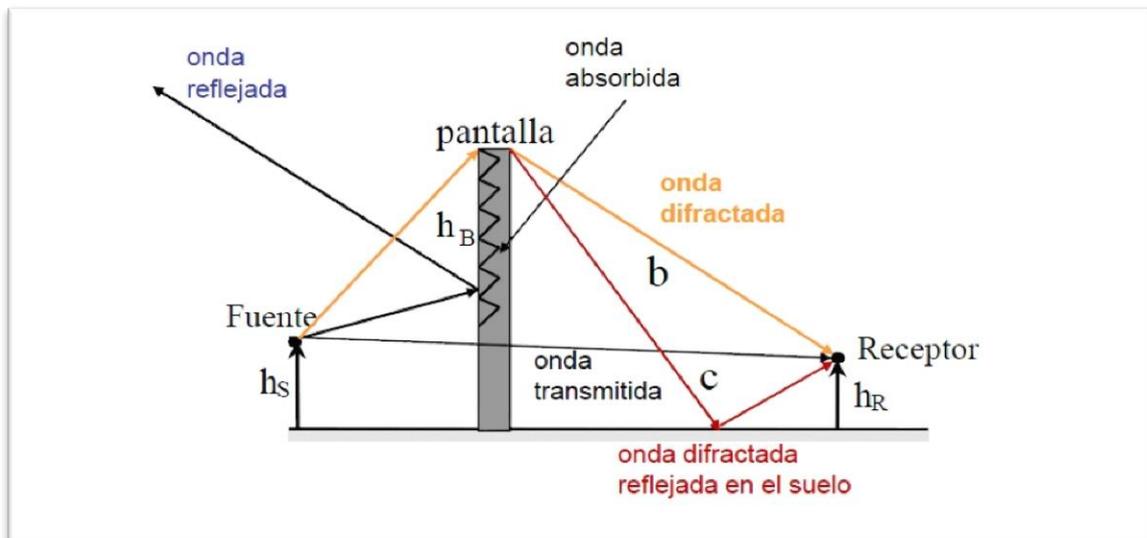


Figura 1. Reflexión, transmisión, absorción y difracción del sonido a través de una pantalla acústica.

Las pantallas o barreras acústicas tienen un papel fundamental según la comunidad internacional para reducir el impacto medioambiental en una carretera como también el ruido ferroviario. La eficacia de las barreras acústicas depende de varios factores tales como:

- La geometría de la barrera: altura, grosor y forma geométrica.
- Características acústicas de la barrera: sus propiedades de reflexión y de difracción del sonido de la superficie expuesta al ruido y de aislamiento.
- Factores relacionados con la instalación: calidad de la mano de obra y montaje.
- Geometría del emplazamiento: perfil del terreno (topografía y tipo de suelo), posición de la pantalla con las fuentes de ruido y receptores.
- Características acústicas del emplazamiento: impedancia del terreno.
- Condiciones meteorológicas: viento, temperatura, humedad, etc.

Además de los factores citados, también se ha de tener en cuenta el aislamiento del sonido para atenuar el ruido transmitido directamente a través de la pantalla, no es tan significativo como el sonido difractado sobre el borde superior de la pantalla. El aislamiento acústico al ruido aéreo de las pantallas depende de dos clases de factores:

- Características intrínsecas: Aislamiento del ruido aéreo, la calidad de la mano de obra, el modo de montaje.
- Características extrínsecas: refieren a las características relacionadas con el emplazamiento.

Hay que tener en cuenta que sólo las características intrínsecas son relevantes para cualificar la barrera en sí misma, por lo tanto, es necesario tener un método para comprobar en el lugar dónde ha sido instalada las características intrínsecas de la misma según las especificaciones del diseño. Las barreras acústicas instaladas con el tiempo pueden sufrir deterioramiento, por lo que las características pueden variar, de tal modo que se ha de inspeccionar cada cierto tiempo para que éstas no varíen y conservar las propiedades acústicas deseadas.

Por todas estas razones, urge la necesidad de implantar un método para testar las características intrínsecas de las barreras acústicas en el emplazamiento donde ha sido instalada, ello encontramos en la Normativa británica, CEN/TS 1793-5: 2003.

De tal modo, este proyecto tiene por finalidad analizar la caracterización de una barrera acústica basada en cristales de sonido aplicando el ensayo descrito en la Normativa británica CEN/TS 1793-5, centrado en el estudio de un método de ensayo para la determinación de las características intrínsecas de la reflexión del sonido en el aire del aislamiento acústico de la barrera, así como, la reducción de los dispositivos. Este método destaca frente a los demás, por caracterizarse en marcar los pasos a seguir para realizar el estudio en el lugar donde se produce la contaminación acústica, es decir, *in situ*, por tanto, el Standard británico se emplea para analizar los materiales instalados con el fin de obtener la respuesta ante el ruido, además de verificar la conformidad del dispositivo elaborado para reducir un ruido determinado.

El método se basa en el promedio de los resultados de varias mediciones realizadas en varios puntos diferentes del dispositivo, aplicando los principios de reflexión del sonido y del aislamiento del ruido aéreo. Dichas medidas, se realizan con los mismos materiales como si el proceso fuera en un recinto cerrado.

Aunque los resultados obtenidos no serán los mismos que aplicando el método en laboratorio, (como por ejemplo el método descrito en la Normativa EN 1793-1), debido a que éste método emplea un campo de sonido direccional, mientras que el método aplicado en laboratorio supone un campo difuso. Además se tiene en cuenta el índice de reflexión, que define la reflexión del sonido en la parte frontal del dispositivo, en cambio, en laboratorio, se emplea un coeficiente de absorción acústico.

No obstante, la comparativa de los resultados de ambos métodos se asemeja, debido a que la respuesta de los resultados obtenidos de las mediciones in situ son comparables pero no idénticos a los resultados en laboratorio, principalmente al utilizarse un campo de sonido direccional, en el primer caso, y en un laboratorio, un campo difuso.

2.2 CRISTALES DE SONIDO

Un cristal de sonido¹ [1] es una matriz de tamaño finito compuesto por dispersores dispuestos en un material homogéneo. En 1993 se procedió a investigar por parte de Yablonovitch y Johnson [3] la propagación de las ondas electromagnéticas dentro de un medio no homogéneo con distribución periódica, donde las propiedades dieléctricas variaban periódicamente en el espacio, lo cual suscitó gran interés.

Dependiendo del número de direcciones en los que se presente la repetición será; unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) o tridimensionales (3D) (ver figura 2):

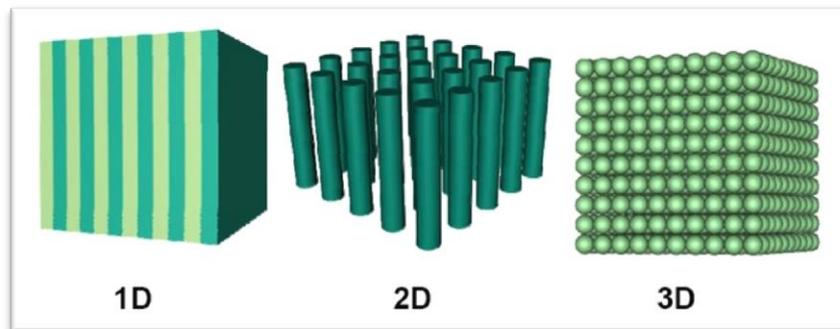


Figura 2: distribuciones unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales.

Un sistema periódico [6] o estructura periódica es aquella que presenta una distribución regular y repetitiva de un material en un espacio. Una estructura periódica también recibe el nombre de estructura cristalina, debido a que los cristales están compuestos de una distribución o red periódica de átomos *regular* de puntos en el espacio. La estructura cristalina se forma cuando se une una base de átomos de forma idéntica a todos los puntos de la red.

Una celda primitiva es un tipo de celda o celda unidad en forma de paralelepípedo con ejes primitivos a_1 , a_2 y a_3 . Una celda llenará todo el espacio mediante la repetición de operaciones de traslación del cristal adecuadas. Es una celda de volumen mínimo.

Existen muchos procedimientos de escoger los ejes primitivos y la celda primitiva para una red determinada. Una forma de escoger una celda primitiva sería la celda de Wigner-Seitz sigue el siguiente procedimiento (ver figura 3): dibujar líneas rectas que unan un punto de la red determinando con todos los puntos de la red próximos. En el punto medio de estas líneas y la normal a ella se dibujan nuevas líneas o planos, obteniendo el volumen más pequeño, todo el espacio puede rellenarse con estas celdas.

¹ Sonic Crystals denominado en inglés. En el texto emplearemos cristales de sonido o CS

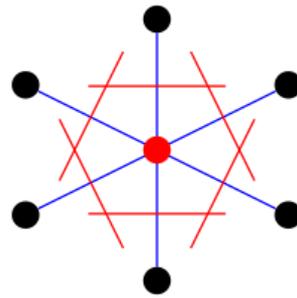


Figura 3: red de Wigner-Seitz

Dado que en este trabajo vamos a analizar un tipo de sistema periódico bidimensional, analizamos ahora los diferentes tipos de periodicidades 2D. Existen cinco tipos de redes bidimensionales genéricas; cuatro redes tipo de redes especiales llamadas red de Bravais y red oblicua es invariante únicamente bajo eje de rotación de π y 2π radiales alrededor de cualquier punto de la red. (ver figura 4):

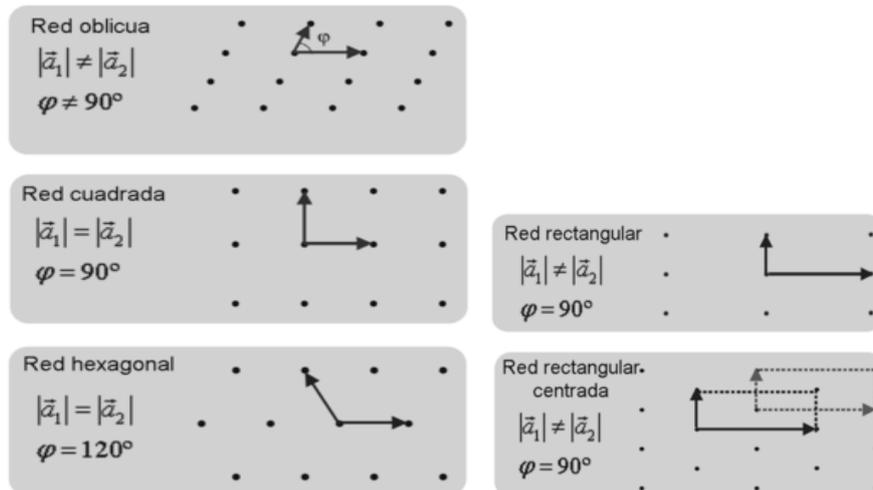


Figura 4: redes bidimensionales: oblicua y Bravais.

2.2.1 LEY DE BRAGG Y BAND GAPS

Las estructuras cristalinas o sistemas periódicos que han sido definidos como: distribuciones periódicas infinitas de un material en un medio con propiedades diferentes, disponen de rangos de frecuencia relacionados con la periodicidad de la estructura para los que no existe propagación de las ondas a su través.

Esto ocurre debido a que no existe ningún modo de vibración en los sistemas, se denominan Band Gaps (BG)² como sus análogos en los cristales semiconductores. Se atribuye por similitud el término de Band Gaps, debido a que depende de la periodicidad de la estructura.

² En el texto se utiliza la denominación en Inglés. En español, Bandas prohibidas (BG).

Teniendo en cuenta que la estructura de los cristales se estudia mediante la difracción de fotones, neutrones y electrones. La difracción depende de la estructura del cristal y de la longitud de onda. Cuando la longitud de onda de la radiación es comparable o incluso menor que la constante de la red, pueden aparecer haces difractados en direcciones muy diferentes de la correspondiente al haz incidente (ver figura 5).

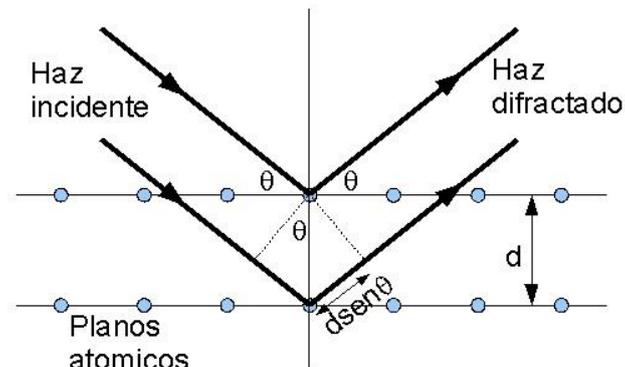


Figura 5: ley de Bragg

La ley de Bragg resuelve este fenómeno de los haces difractados de un cristal, debido a que estudia las interferencias constructivas producidas en una estructura periódica al difractar una onda en ella teniendo en cuenta la dirección de la onda difractada.

La interferencia es constructiva si la diferencia entre los caminos que recorren los rayos reflejados en distintos planos o elementos de la estructura es un múltiplo entero, n , de longitudes de onda, λ . (ver figura 6).

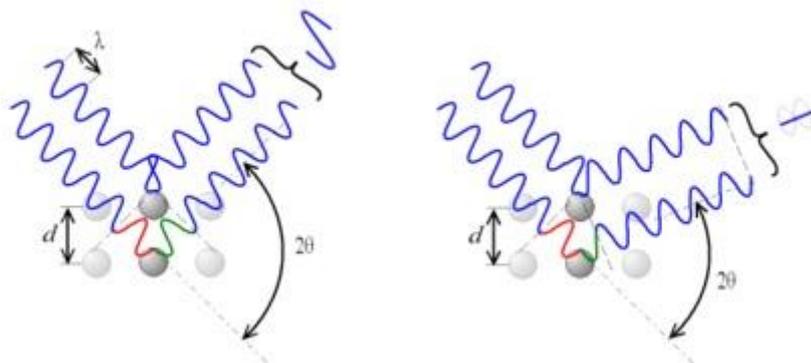


Figura 6: interferencia constructiva y interferencia destructiva en ángulo base 2θ .

La expresión analítica de la ley de Bragg (1) es la siguiente:

$$n\lambda = 2d \sin(\theta) \quad (1)$$

Donde d representa la distancia entre los distintos planos de la red y θ es el ángulo que forma la onda incidente y la onda reflejada.

La reflexión de Bragg puede producirse únicamente para longitudes de onda $\lambda \leq 2d$.

Aunque la reflexión en cada plano es especular, sólo para ciertos valores de θ las reflexiones procedentes de todos los planos paralelos se sumarán en fase para dar un haz reflejado intenso.

Por lo que se generan rangos de frecuencia donde la onda puede propagarse o no a través del sistema periódico, como hemos denominado anteriormente, hablamos de las bandas prohibidas o bandgaps.

La teoría de bandas se emplea en física del estado sólido para describir la estructura electrónica de un material como una estructura de bandas electrónicas o estructura de bandas de energía. Se basa en que los electrones de un sólido cristalino se distribuyen en bandas de energía separadas por regiones para las que no existen estados electrónicos permitidos. Estas regiones se denominan "gaps" de energía.

La banda prohibida es la diferencia de energía entre el punto más bajo de la banda de conducción y el más elevado de la banda de valencia de un elemento. El punto más bajo de la banda de conducción se denomina borde de la banda de conducción; el punto más elevado de la banda de valencia se denomina borde de la banda de valencia.

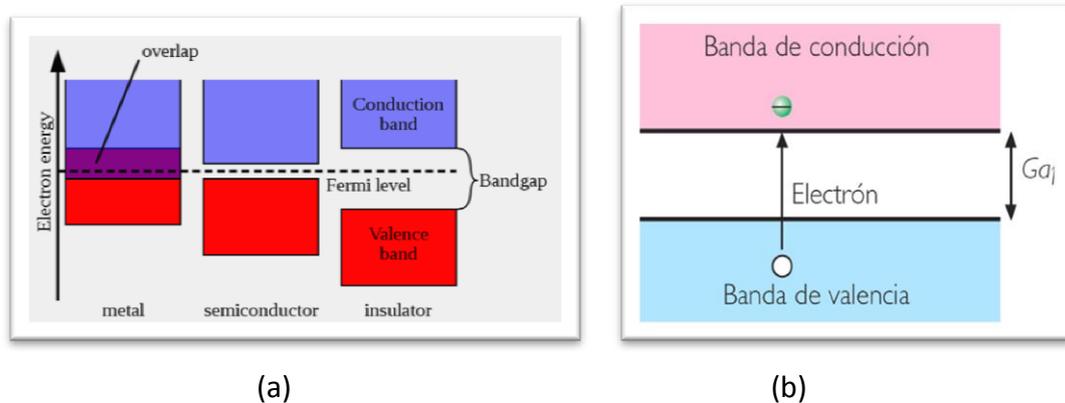


Figura 7: (a) Disposición de bandas de energía en metales, semiconductores y aislantes. (b) esquema de bandas correspondiente a la conductividad intrínseca de un semiconductor.

Por tanto, el BG surge cuando un electrón no puede transmitirse con la energía en ninguna dirección del interior del cristal. Si el BG aparece únicamente en alguna dirección de simetría del cristal, se denomina pseudogaps. Un BG completo aparece debido al solape entre pseudogaps en las diferentes direcciones de simetría (ver figura 8).

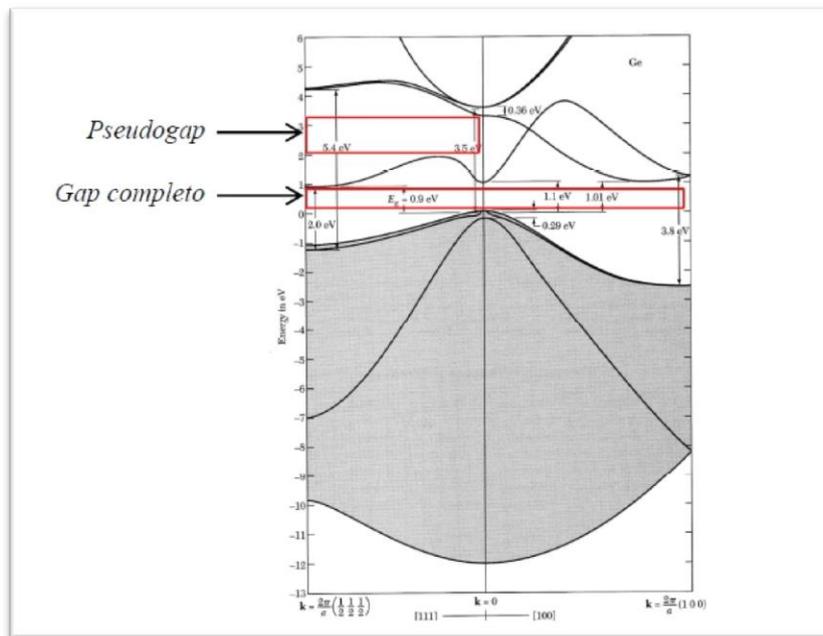


Figura 8: estructura de bandas pseudogap y gap completo.

La relación de las BG conllevó el estudio comparativo del proceso de propagación de las ondas acústicas en un medio no homogéneo y periódico.

Varias teorías plantearon analizar la matriz periódica procedente de sólido isotrópicos integrados en un medio elástico isotrópico. Por analogía con el caso electromagnético, estas disposiciones periódicas presentes en las BG por ondas elásticas fueron llamadas photonic crystals. Se dice que si un material elástico en un photonic cristal en un medio fluido, luego pasa a llamarse cristal de sonido (CS).

Diversos estudios dicen que existen similitudes y diferencias entre ambos tipos de cristales. Desde que las propiedades acústicas de los CS fueron medidas en una estructura, muchos investigadores se interesaron en evaluar ambas partes: experimental y teórica. Se centraron en BG elásticos/acústicos iniciando una interesante visión para aplicar filtros elásticos/acústicos, control del ruido, mejoras en el diseño de las estructuras, además, como se plantea en este proyecto aplicar en barreras para el control de ruido de tráfico.

2.2.2 FENÓMENOS ADICIONALES: RESONANCIAS Y ABSORCIÓN

En un principio, emplear CS como barreras acústicas, era insuficiente por la mera razón de que hubieran BG, debido a que la posición y el tamaño de las BG dependen de factores como el ángulo de incidencia de las ondas o la disposición de los dispersores. Con el fin de llevar una mejora en la aplicación los CS en las barreras acústicas, se abordaron en los últimos años varias estrategias para incrementar las propiedades acústicas de los CS.

Se estudiaron nuevas disposiciones de los dispersores, y dispersores con propiedades adicionales, de esta formase conseguía reducir el ángulo de atenuación por la disposición periódica, el incremento del nivel y el rango de atenuación frecuencial. Muchos autores diseñaron dispersores con material absorbente en su interior, por lo que la dispersión era múltiple como los efectos de absorción. Por tanto, los dispersores con efectos resonantes han sido un avance dando resultados eficaces por el hecho de estar bajo las frecuencias de las BG.

Así pues, recientemente se han aplicado estos estudios con el fin de incrementar las propiedades de los CS en las barreras acústicas.

En este trabajo, la barrera estudiada está basada en CS, que se caracteriza por lo siguiente:

Bloques de cilindros rígidos con cavidades que actúan de resonadores, con material absorbente. Por tanto, presentan, además de BG, rangos de frecuencia relacionados con las propiedades de resonancia y de absorción

RESONANCIAS: RESONADOR DE HELMHOLTZ

Consiste en una cavidad rígida con volumen V con un cuello de área S y longitud L . Si $\lambda \gg l$, el fluido en el cuello se mueve como una unidad y constituye el elemento de masa. Si $\lambda \gg \sqrt[3]{V}$, la presión acústica dentro de la cavidad proporciona el elemento de rigidez (ver figura 9).

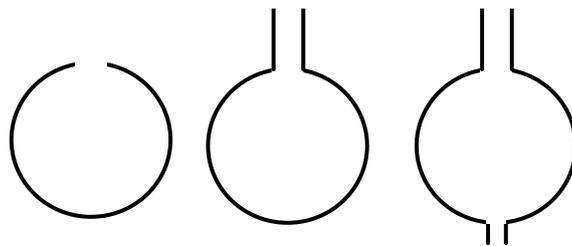


Figura 9: Ejemplos de resonadores simples de Helmholtz.

Un resonador de cavidad consta de un volumen de aire confinado en el recinto por una abertura estrecha (Ver figura 9). Actúa como resonador de Helmholtz, absorbiendo la energía acústica de una manera más eficiente en una banda estrecha de frecuencias cerca de su resonancia. En este caso, se conforma un conjunto de paneles perforados enrejados de metal separados por un fondo sólido de material poroso entre ellos.

ABSORCIÓN: MATERIALES POROSOS (LANA DE ROCA)

La lana de roca es un material fabricado a partir de roca volcánica, perteneciente a la familia de lanas minerales. Se caracteriza por tener una estructura fibrosa multidireccional y elástica, por lo que, frena el movimiento de las partículas de aire y disipa la energía sonora, empleándose como material absorbente en proyectos de aislamiento y acondicionamiento, evitando reverberaciones y/ o ecos.

Son varios los autores, como por ejemplo Biot [6], Zwicker y Koster [6], que se han dedicado a desarrollar modelos y teorías que intentan predecir el comportamiento de los materiales desde el punto de vista acústico. El más conocido de los modelos empíricos es el de Delany y Bazley [6] que presentaron unas relaciones a partir del ajuste de un gran número de mediciones experimentales en materiales fibrosos con porosidades cerca de 1.00 (el factor de porosidad es la relación entre el volumen de aire en los poros y el volumen total del material), proponiendo expresiones de los valores de la impedancia característica y de la constante de propagación para un conjunto de materiales absorbentes del sonido de tipo fibroso. Las relaciones para el cálculo de estos dos parámetros son función de la relación entre la frecuencia (f) y la resistencia específica al flujo (σ).

Delany y Bazley determinaron la impedancia característica compleja (Z) (2) y la constante de propagación compleja (T) (3) siendo las siguientes expresiones:

$$Z = \rho c \left[1 + 0.0571 \left(\frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0.754} - j0.087 \left(\frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0.732} \right] \quad (2)$$

$$T = \frac{2\pi f}{c} \left[1 + 0.0978 \left(\frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0.700} - j0.189 \left(\frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0.595} \right] \quad (3)$$

Donde:

ρ (kg/m^3) es la densidad del aire.

c (m/s) es la velocidad del sonido en el aire.

f (Hz) es la frecuencia.

σ ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$) es la resistencia específica al flujo por unidad de espesor y depende de la densidad del material y del diámetro de la fibra.

Estas dos ecuaciones son válidas si:

$$10^{-2} \leq \frac{f}{\sigma} \leq 1$$

Para el cálculo de la impedancia característica y de la constante de propagación sólo es necesario conocer el valor de la resistencia específica al flujo (σ).

2.3 ESTRUCTURA A ANALIZAR

2.3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES Y EMPLAZAMIENTO

La muestra de estudio es una barrera acústica como se ha mencionado anteriormente basada en CS (ver figura 10), compuesta por bloque de cilindros con la misma altura y con diferentes diámetros. Está situada en el campus de Gandía, perteneciente a la Universidad Politécnica de Valencia, a 10 metros del Camí vell de Valencia; carretera cv-605 de doble sentido con afluencia de vehículos, velocidad máxima de 60 km/h (ver figura 11). Al otro lado, se encuentra el parking del campus.



Figura 10: barrera acústica a estudiar en el presente trabajo.

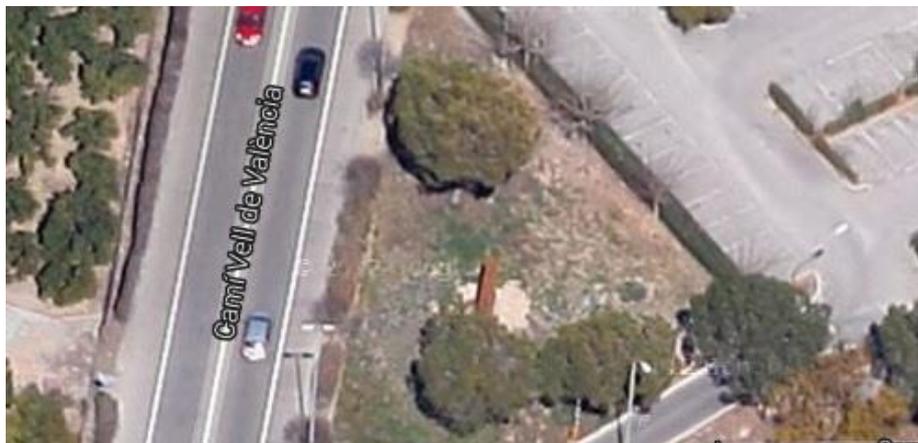


Figura 11. Plano aéreo del emplazamiento de la barrera acústica.

3.2 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

En este sistema la distribución periódica de las propiedades de los dispersores rígidos conduce al fenómeno de las BG, el material absorbente de cada dispersor da un umbral de atenuación de frecuencias audibles, y las cavidades resonantes dan una atenuación en relación con los resonadores.

Por tanto, en esta barrera acústica encontramos multi- fenómenos de dispersión; resonancias (en baja frecuencia), absorción (en valores medios-altos de frecuencia) y dispersión (haciendo uso de la periodicidad de la estructura, es decir, el uso de la interferencia Bragg).

Se observan tres partes:

Una base forjada por una lámina de hierro, el núcleo es un cilindro de hierro con una ranura de ($l=20$ mm) a lo largo de toda su longitud. Sirve como soporte estructural de los dispersores (ver figura 12).



Figura 12: base de la estructura.

La parte frontal y trasera consta de 14 cilindros con diámetro externo de 165 mm y 4,85 mm de espesor, y 28 con un diámetro externo de 114.3 mm y 4.5 mm de espesor.

La cubierta y cavidad interior del cilindro: consiste en una cavidad resonante, siendo la pared rígida forjada de hierro y una cubierta absorbente por material poroso (lana de roca con una densidad de 100 kg/m^3 y 40 mm de espesor).

El comportamiento del dispersor está diseñado teniendo en cuenta la abertura (L), el radio del interior de la cavidad (r), y el espesor de la abertura (Δ_r). Hay dos tipos de dispersores, con el fin de cubrir mayor rango de frecuencias bajas (ver figura 13 y 14)

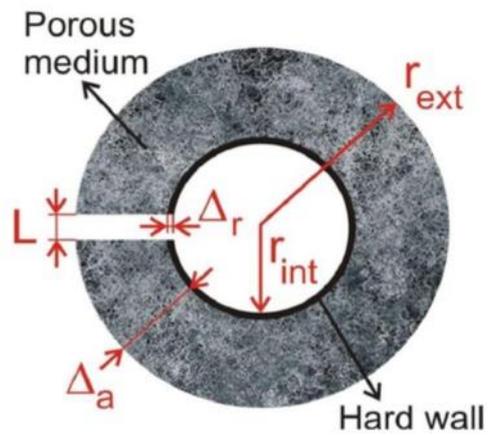


Figura 13: Estructura de los cilindros.

Los cilindros están recubiertos por una rejilla de hierro (1 mm de espesor y con perforaciones de 5 mm) para proteger de agresiones externas y evitar el deterioro de la lana de roca.

La cubierta porosa tiene la finalidad de cubrir las frecuencias medio-altas.



Figura 14: detalle de los cilindros recubiertos por la rejilla.

2.4 DESCRIPCIÓN DE LA NORMATIVA

2.4.1. PARÁMETROS

SEÑALES MLS

El método descrito en la norma CEN/TS 1793-5 requiere la generación de una señal apropiada, ésta será de tipo MLS (secuencia de máxima longitud). Es una señal pseudo-aleatoria y periódica en la que se producen todas las combinaciones posibles de bits durante un ciclo de repetición. Se trabaja con un altavoz y un micrófono para calcular la correlación cruzada entre la salida y la entrada, con el fin de obtener el resultado de la respuesta al impulso del dispositivo, lo que permite conocer el contenido frecuencial. Las secuencias de máxima longitud son básicamente una secuencia de pulsos con patrón psuedo-aleatorio, que se repiten en un periodo $L=2N-1$, (siendo n entero). Su principal propiedad es que es robusta al ruido de fondo.

La frecuencia de muestreo afecta a la duración de un ciclo de señal MLS emitida por el altavoz. Hecho que la duración de un ciclo de señal MLS emitido, T_s , dependa del tamaño de la secuencia binaria, L y del tiempo existente entre dos pulsos Δt , sea recíproco con la frecuencia de muestreo:

$$T_s = L\Delta t = \frac{L}{f_s} \quad (3.2)$$

Tiene una alta inmunidad al ruido de fondo, debido a que el ruido de fondo recibido por el micrófono tiene que estar correlado con la señal MLS emitida, dando como resultado ceros (ver figura 15).

En la práctica, el ruido de fondo puede tener influencia residual, en especial cuando se mide una relación de señal a ruido, en este caso, la respuesta del impulso puede ser más promediada mediante la repetición de la generación, muestreo y correlación del ciclo de señal MLS.

Según el método, el altavoz estará en una cara de la barrera acústica y el micrófono en la cara opuesta. Se realizará una medida sin barrera, con el fin de obtener el sonido directo así como calcular los efectos que produce la barrera; reflexiones del sonido y propagación de las ondas.

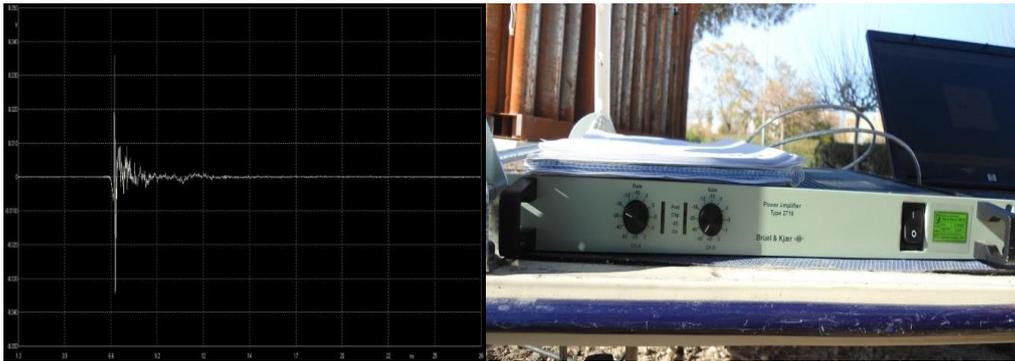


Figura 15: Señal MLS generada por la tarjeta Clivio.

VENTANA ADRIENNE:

Puesto que el método incide en determinar las pérdidas de atenuación y transmisión a través de la barrera, las últimas ondas de sonido se eliminan por factorización de la respuesta al impulso mediante un ancho rectangular o ventana temporal en función del nivel sobre la parte relevante de la respuesta al impulso, siendo cero en la parte exterior para que los impulsos tardíos se excluyan, es decir, anula las reflexiones que llegan después de un cierto retardo de tiempo, y por lo tanto procedente de ubicaciones más lejanas de una distancia determinada. Por consiguiente, la ventana temporal Adrienne, tiene las siguientes especificaciones (Ver figura 16):

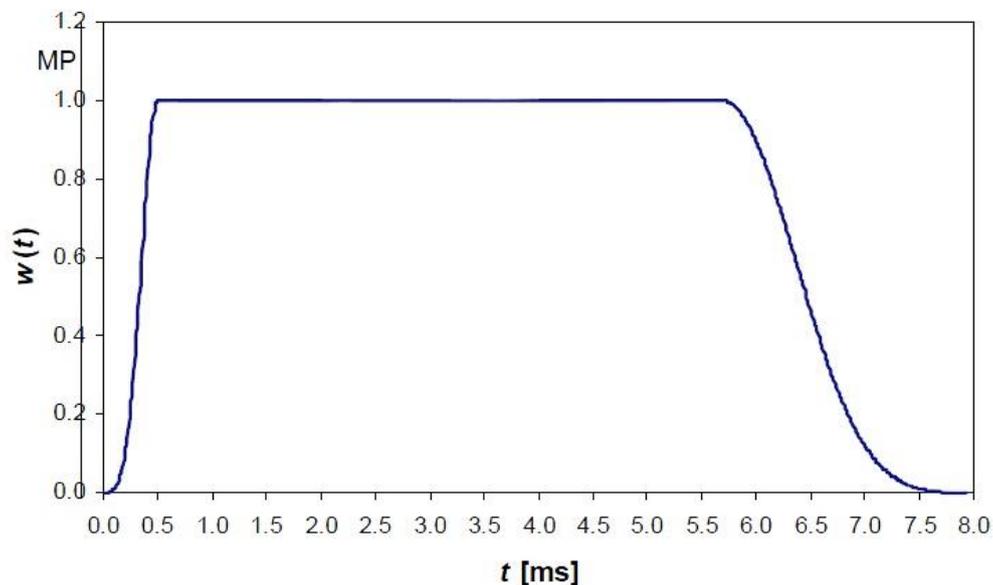


Figura 16: Ventana Adrienne

- La parte delantera llamada Blackman-Harris con una duración de 0.5 ms, correspondería a la sección pre-ventana.
- La parte intermedia, que correspondería con el cuerpo de la señal con duración con duración de 5.18 ms.

- La parte final que correspondería a la parte derecha de la señal Blackman-Harris con una duración de 2.22 ms.
- La ventana temporal Adrienne tiene una duración total de 7.9 ms.

Siendo la ecuación de Blackman-Harris

$$w(t) = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2\pi t}{T_{w,bh}}\right) + a_2 \cos\left(\frac{4\pi t}{T_{w,bh}}\right) - a_3 \cos\left(\frac{6\pi t}{T_{w,bh}}\right) \quad (4)$$

Donde $a_0=0.35875$
 $a_1=0.48829$
 $a_2=0.14128$
 $a_3=0.01168$

Emplazamiento de la ventana de Adrienne:

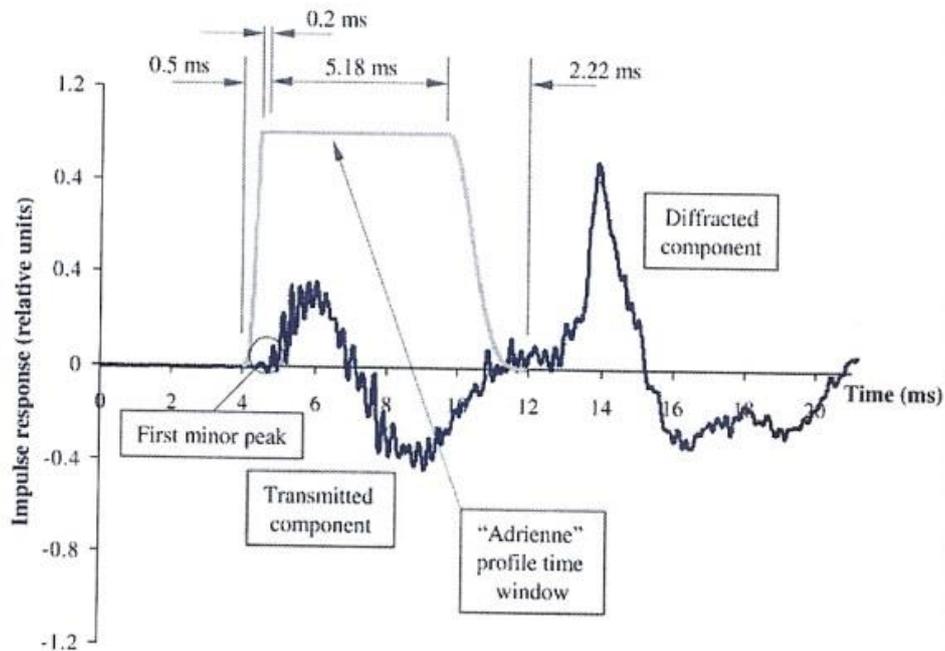


Figura 17 : Ventana de Adrienne

Para la componente de sonido directo, la ventana de Adrienne debe de estar emplazada de la siguiente manera (ver figura 17):

- La componente continua estará localizada 0.2 ms antes de donde se encuentra el pico que representa la componente continua de la señal.

- La componente reflejada estará localizada 0.2 ms antes del primer pico de la componente reflejada.

DEFINICIÓN DEL ÍNDICE DE AISLAMIENTO DE SONIDO³ SI:

PRINCIPIO GENERAL:

La fuente de sonido transmite ondas transitorias que viajan hacia la barrera acústica donde parte de la onda se refleja y otra se difracta. El micrófono está situado al otro lado de la barrera recibiendo ambas ondas, la onda acústica que viaja desde la fuente y pasa por la barrera acústica, y la onda acústica que difracta por el borde superior de la misma.

La geometría que tenemos que tener en cuenta para realizar este tipo de medida va a ser la siguiente (ver figura 18):

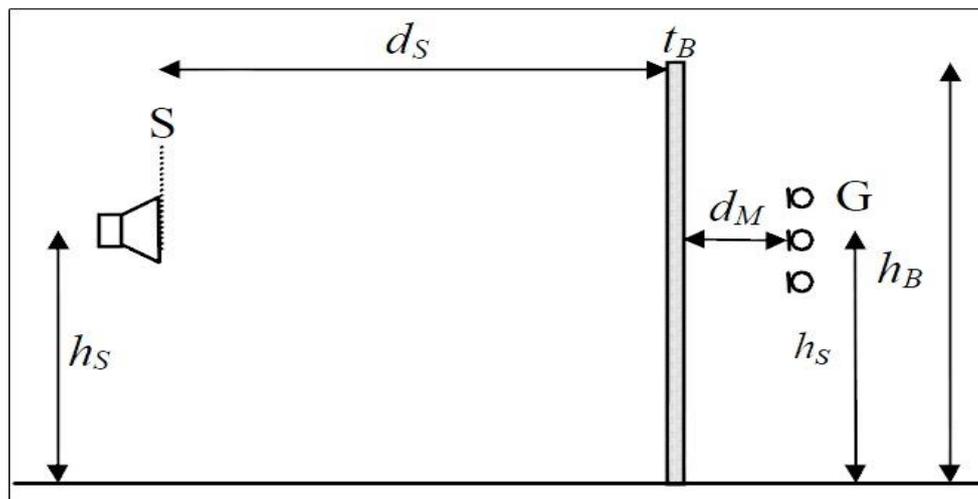


Figura 18 : Montaje para la medida del aislamiento del dispositivo.

- H_b Altura de la barrera 4 m.
- H_s referencia de la posición del altavoz, tiene que estar situado a 2 m de altura.
- H_m altura del micrófono central.

³ Index Sound Insulation (SI), en castellano índice del aislamiento acústico.

- D_s separación entre la barrera y el altavoz será 1 m.
- D_m separación entre la barrera y el micrófono 0.25 m.
- T_b grosor de la barrera.

Se obtendrá la respuesta al sonido directo si las mediciones del altavoz al micrófono se hacen sin la barrera acústica. La geometría ha de tener en cuenta para este segundo caso es la siguiente (ver figura 19):

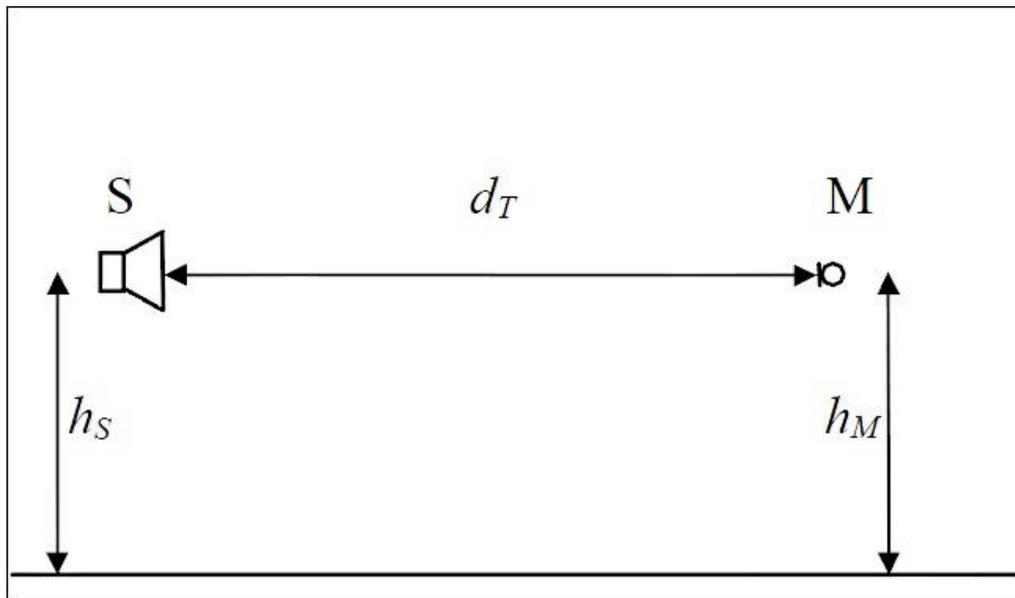


Figura 19: Montaje para la medida de la componente directa.

- H_s distancia de referencia del altavoz será 2 m.
- D_t separación entre el altavoz y el micrófono será 1.25 más el grosor de la barrera, es decir: $D_s + D_m + T_b = 1.25 + T_b$

El espectro de la componente directa y la onda transmitida, son corregidas para tener en cuenta la longitud de trayectoria entre las dos señales, dando la base para calcular SI.

El índice de aislamiento acústico (SI) resultante será la media logarítmica de los índices de aislamiento acústico medidos en las nueve posiciones de micrófono asignadas.

Con el fin de obtener un aislamiento acústico de la barrera lo más óptimo posible, es necesario que la captación del micrófono sea muy precisa. Por ello, se emplean nueve posiciones de micrófono equidistantes formando una cuadrícula vertical que parte desde el centro de la barrera. La distancia entre la barrera y los micrófonos es de 0.25 m (Ver figura 20).

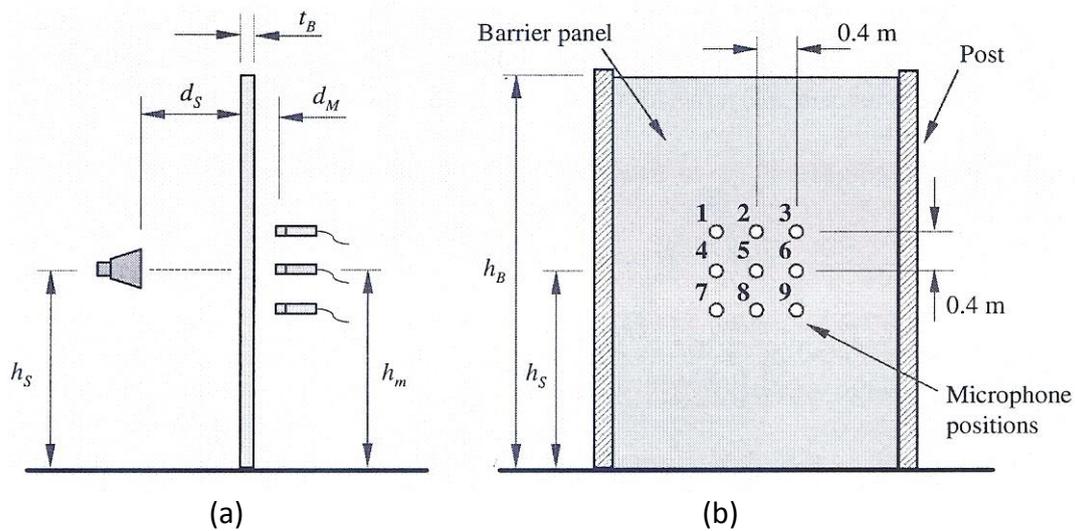


Figura 20: (a) montaje altavoz y micrófono en el dispositivo para medir el aislamiento, la distancia del altavoz con el dispositivo es de 1 m.
 (b) montaje de la disposición del altavoz y micrófono en el dispositivo para medir el aislamiento. Nueve posiciones equidistantes con separaciones de 0.4 m a una distancia del dispositivo de 0.25 m.

La medición del índice SI se debe de realizar en campo libre de reflexiones, se empleará la ventana temporal Adrienne para eliminar las reflexiones procedentes de otros elementos que lindan con los alrededores de nuestro estudio de medición.

La expresión analítica para el cálculo del índice de aislamiento del sonido en tercios de octava es la siguiente:

$$SI_{ij} = -10 \log \left\{ \frac{\sum_{k=1}^n \int_{\Delta f_j} |F[h_{tk}(t) * w_{tk}(t)]|^2 df \left(\frac{dk}{di}\right)}{n * \int_{\Delta f_j} |F[h_i(t) * w_i(t)]|^2 df} \right\} \quad (5)$$

Donde:

$h_i(t)$: componente de incidencia de la respuesta al impulso de sonido directo.

$h_{t,k}(t)$ es la componente transmitida de la respuesta al impulso de k-th de los 9 puntos.

$d_i(t)$ es el factor de corrección de propagación geométrica para la componente de campo libre

$d_k(t)$ es el factor de corrección de propagación geométrica para la componente de transmisión en el punto k-ésimo ($k = 1, \dots, n$);

$w_i(t)$ es el factor de referencia del campo libre que determina la componente temporal de la ventana de Adrienne.

$w_{tk}(t)$ corresponde a la ventana temporal de Adrienne respecto a la componente transmitida para k-th puntos posibles.

F Transformada de Fourier.

j es el índice que determina la frecuencia en banda de tercios de octava entre 100 Hz a 5 kHz.

D_{fj} corresponde al ancho de banda en tercios de octava.

$n = 9$ es el número de puntos posibles.

Hay que tener en cuenta la geometría de los factores $d_i(t)$ y $d_k(t)$ debido a la cuadrícula que forma las nueve posiciones de micrófono:

$$d_1=d_5=d_7=d_8 = t_B + d_M = 1.25 + t_B$$

$$d_2=d_4=d_6=d_8 = \sqrt{d_i^2 + s^2}$$

$$d_1=d_3=d_1=d_9 = \sqrt{d_i^2 + 2s^2}$$

donde t_B es el espesor de la barrera acústica definida en metros.

s es la distancia de punto a punto (0.4 m).

El esquema de los componentes esenciales que conforman la medición de un sistema sería el siguiente:

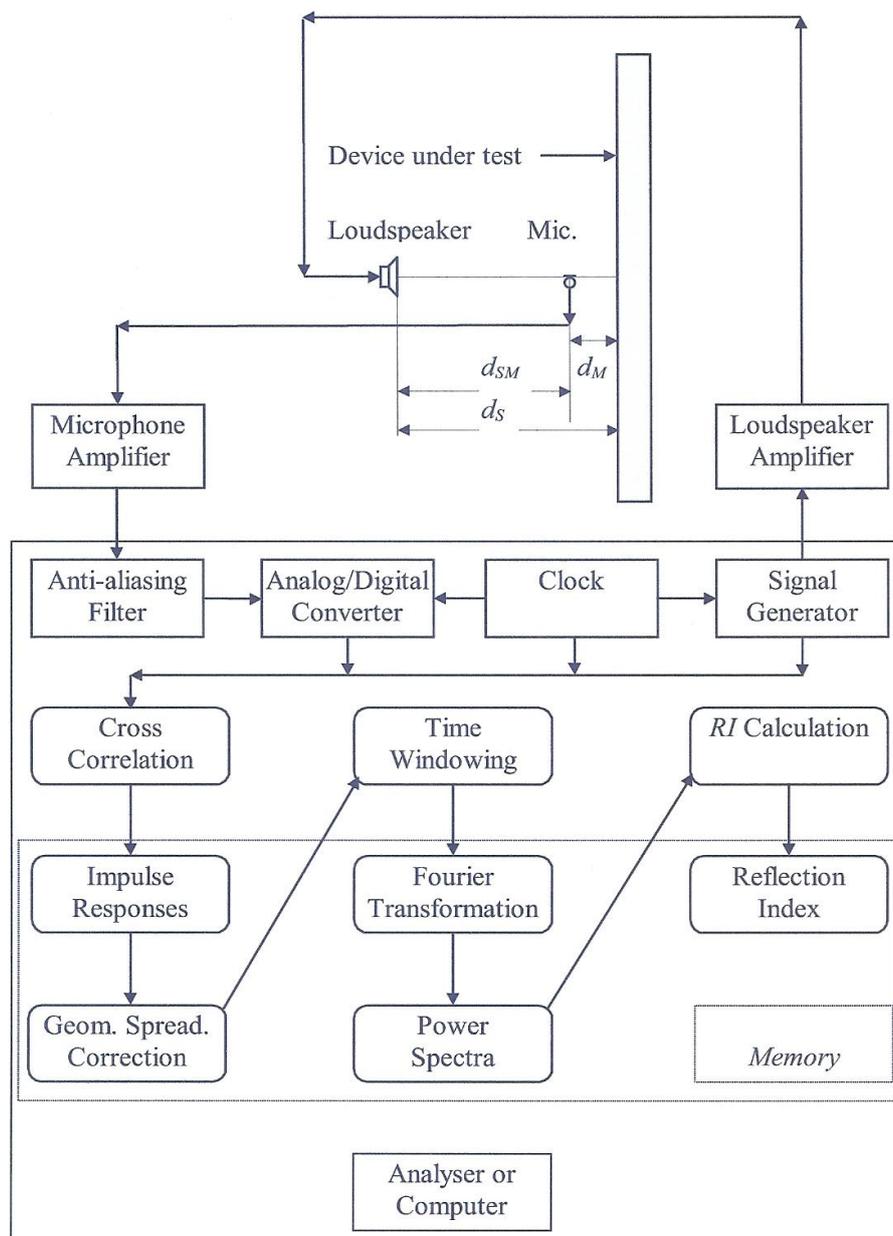


Figura 21: Diagrama de bloques de los componentes que generan el cálculo del índice de aislamiento del sonido (SI).

Por tanto, realizar la medición del índice SI necesitaremos:

Un sistema electro-acústico, consiste en un generador de funciones MLS (máximo length signal), un amplificador y un altavoz, un micrófono con amplificador y un analizador de señales que pueda realizar transformaciones en el dominio del tiempo así como en el dominio frecuencial, un ordenador.

La señal con la que trabajaremos es MLS (maximum length signal), será ajustada para que esté acoplada con el altavoz. La relación S/N se puede mejorar repitiendo la misma señal de prueba promediando y sincronizando la respuesta al micrófono.

El rango de la señal será 100 Hz hasta los 5 kHz en banda de tercios de octava.

El método tiene una buena inmunidad al ruido de fondo, es decir, que la relación S/N efectiva puede elevarse de 10 dB en todo el rango de frecuencias de interés dentro de un período de medición corto (no más de cinco minutos para la obtención de la respuesta al impulso).

La frecuencia de muestreo puede escogerse con un valor alto para poder corregir de forma precisa los posibles desplazamientos temporales en la respuesta al impulso dada en la medición con barrera y también en la medición de campo libre debido a los cambios de temperatura que pueden presentarse.

CALIBRACIÓN:

El procedimiento de medición descrito se basa en las proporciones de los espectros de potencia de las señales extraídas de la respuesta al impulso de las mediciones, todo ello realizado con el mismo equipo en el mismo emplazamiento con las mismas condiciones.

Por lo que, se entiende, que no es necesario calibrar el proceso de medición con respecto al nivel de presión sonora. De todos modos, se recomienda comprobar el correcto funcionamiento de la cadena de medición desde la primera toma hasta la última.

TEOREMA DE NISQUIT:

Se puede enunciar el teorema de muestreo o teorema de Nyquist para señales limitadas en banda de energía finita de dos modos:

- Una señal limitada en banda de energía que no tiene componentes a frecuencias mayores que W Hz se puede representar de forma exacta especificando los valores de la señal en instantes de tiempo separados $T_s = 1/2W$ segundos.
- Una señal limitada en banda de energía sin componentes frecuenciales superiores a W Hz se puede recuperar de forma exacta a partir de sus muestras tomadas a una tasa de $f_s = 2W$ muestras por segundo.

La tasa de muestreo $f_s = 2W$ definida para una señal con *ancho de banda* W se denomina tasa de Nyquist. El teorema de muestreo es la base de la equivalencia entre señales analógicas y digitales.

El teorema de muestreo se basa en la suposición de que la señal $g(t)$ sea estrictamente limitada en banda. Esto sólo se satisface si $g(t)$ tiene duración infinita. Es decir, una señal estrictamente limitada en banda no puede ser simultáneamente estrictamente limitada en tiempo y viceversa. Sin embargo, se va a poder aplicar en la práctica el teorema de muestreo a señales limitadas temporalmente cuando éstas sean esencialmente limitadas en banda en el sentido de que fuera de la banda de interés el valor que toma el espectro no es relevante. Esto justifica la aplicación práctica del teorema de muestreo.

Cuando la tasa de muestreo fs excede a la de Nyquist $2W$, las réplicas de $g(f)$ requeridas para la construcción de $G\delta(f)$ están más separadas por lo que no existe ningún problema a la hora de recuperar la señal original $g(t)$ a partir de la señal muestreada $g\delta(t)$ con el procedimiento descrito. Sin embargo, cuando la tasa de muestreo fs es menor que $2W$, se puede ver que al construir la señal $G\delta(f)$, las réplicas de $G(f)$ aparecen solapadas.

En este caso el espectro $G\delta(f)$ pasaría a ser el de la figura 22. Las altas frecuencias de $G(f)$ se ven reflejadas hacia las bajas frecuencias en $G\delta(f)$. Este fenómeno se denomina aliasing. Es evidente que comprobar que si la tasa de muestreo fs es menor que la de Nyquist $2W$, la señal original $g(t)$ no se puede recuperar de forma exacta a partir de las muestras y, por lo tanto, se pierde información en el proceso de muestreo.

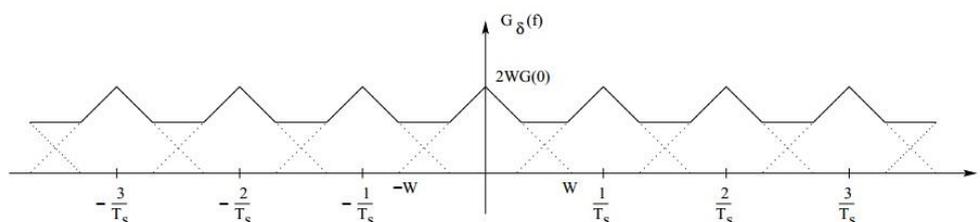


Figura 22: espectro de la señal muestreada para el caso de $fs \leq 2W$

Debido a que una señal, como ya hemos dicho, no puede ser estrictamente limitada en tiempo y frecuencia, si la señal es finita en el tiempo, siempre existirá algo de aliasing y se perderá parte de la información en el proceso de muestreo. Sin embargo, este efecto suele ser en general despreciable. Para que así sea:

- Antes de muestrear la señal, habrá que emplear un filtro paso bajo antialiasing para atenuar las componentes a alta frecuencia de la señal (o del ruido) fuera de la banda de interés.
- Muestrear la señal filtrada ligeramente por encima del límite de Nyquist. Es interesante resaltar que el uso de una tasa de muestreo superior a la de Nyquist tiene el efecto deseable de hacer más sencillo el filtro paso bajo de reconstrucción para recuperar la señal. Ya no es necesario que sea un filtro

ideal. Con una tasa de muestreo superior a la de Nyquist las repeticiones de $G(f)$ en el espectro de la señal muestreada $G\delta(f)$ a parecen separadas $f_s - 2W$ Hz. En particular, se puede elegir un filtro paso bajo de reconstrucción con un ancho de banda B que satisfaga $W < B < f_s - W$. Además el filtro paso bajo no es necesario que sea ideal y puede tener una zona de transición más suave que caiga en el intervalo $(W, f_s - W)$.

FRECUENCIA DE MUESTREO:

La frecuencia que obtenemos con la respuesta del micrófono depende de la frecuencia límite de las medidas tomadas y de la frecuencia anti-aliasing.

La frecuencia de muestreo f_s ha de tener un valor superior a 43 kHz, además debe de ser igual que la frecuencia de muestreo del generador de señal.

En nuestro caso se ha empleado un filtro Butterworth, diseñado para producir la respuesta más plana que sea posible hasta la frecuencia de corte.

EL RUIDO DE FONDO

La relación señal a ruido se debe de tener en cuenta la muestra promedio, que tiene que ser mayor 10dB sobre el rango de frecuencia de las mediciones. Al emplear señal tipo MLS de correlación cruzada, proporciona altas relaciones de S/N.

Procedimiento de montaje:

El sistema para la obtención de las mediciones se ha de colocar como se ha especificado en el apartado anterior (ver figura 18 y 19)

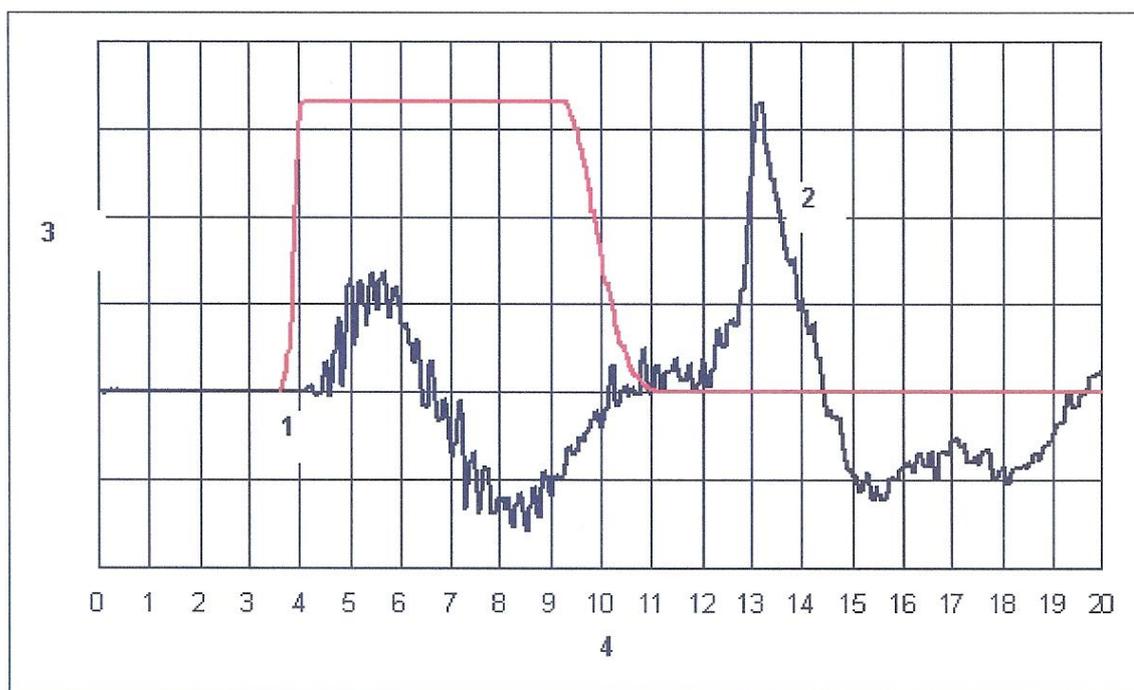
EMPLAZAMIENTO DE LA VENTANA DE ADRINNE:

Como se ha expuesto en el apartado de Ventana Temporal de Adrienne, el emplazamiento que tendrá la ventana respecto a la señal obtenida con el cálculo de SI será la siguiente:

La componente directa viene representada por el primer pico de la respuesta al impulso, por lo que situaremos la ventana en un instante de tiempo anterior al pico de la componente directa de 0.2 ms, colocamos la ventana temporal Adrienne. Es decir, la ventana comienza 0.2 ms antes que aparezca el primer pico de la señal que corresponde a la componente directa.

Para el caso de la componente de transmisión el emplazamiento será el siguiente:

Cuando comienzan las reflexiones, se toma un instante anterior de 0.2 ms, se coloca la ventana Adrienne (figura 23). Desde este punto se deja transcurrir 7.4 ms y justo 0.2 ms antes de que comiencen los primeros picos que representan la difracción se coloca el último punto de la ventana.



1 Transmitted component 2 Diffracted component
3 Impulse response [relative units] 4 Time [ms]

Figura 23: emplazamiento ventana temporal Adrienne para el cálculo del SI.

LÍMITE DE BAJA FRECUENCIA Y TAMAÑO DE LA MUESTRA

El método en el que nos estamos basando para realizar el estudio de este proyecto, se especifican diferentes tamaños de barrera.

El límite de la f_{min} (baja frecuencia) de las mediciones del índice de aislamiento acústico depende de la forma y anchura de la ventana temporal de Adrienne. El ancho de la misma dependerá de la altura o longitud para reducir el ruido bajo el estudio del dispositivo que se emplea.

Se ha de prescindir de los siguientes elementos que interfieran en la ventana temporal de Adrienne como son:

- Las componentes de sonido difractadas por los bordes de la reducción de ruido dispositivo bajo prueba.

-Las componentes de sonido reflejadas por el suelo en el lado receptor de la fuente de reducción de ruido dispositivo bajo prueba.

-Para la reducción de ruido de los dispositivos que tienen una altura menor que la longitud, la componente más problemática es la que difracta por el borde superior y por lo tanto la dimensión crítica es la altura.

La siguiente gráfica (ver figura 24) muestra los valores de f_{min} de frecuencia respecto a las mediciones del índice de aislamiento acústico y la altura de la barrera acústica.

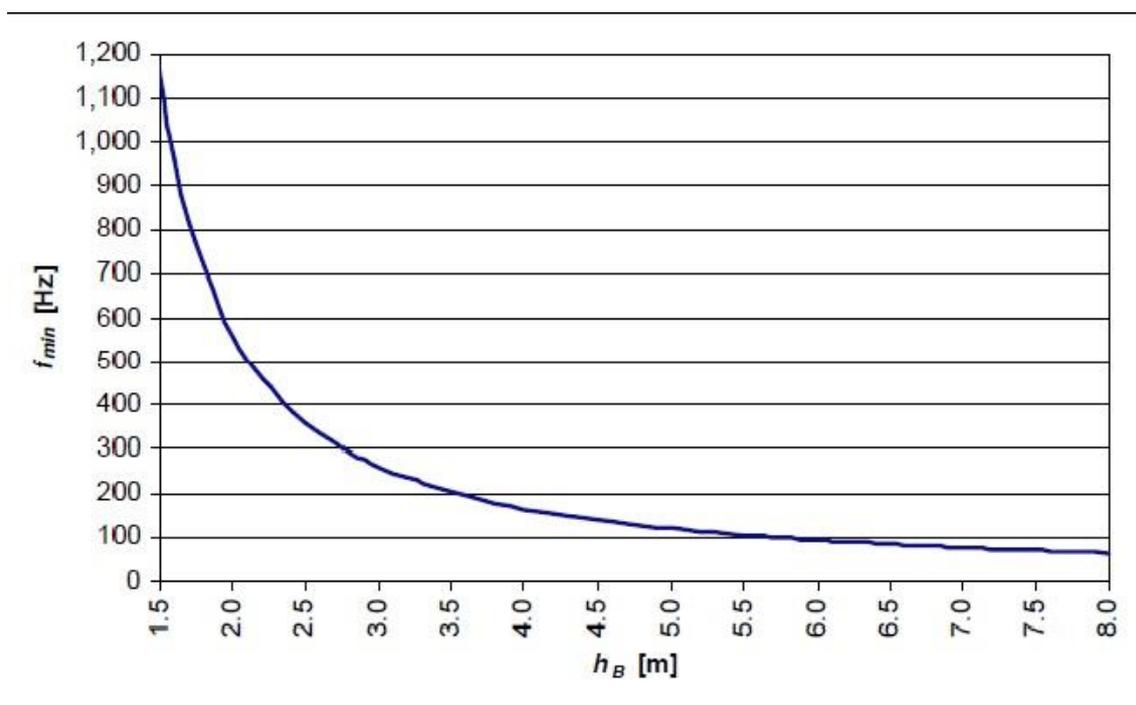


Figura 24: Frecuencia mínima que se ha de cumplir respecto a la altura que ha de tener la barrera en estudio.

Conforme va aumentando la altura de la barrera, el límite de f_{min} va decreciendo exponencialmente. El valor mínimo que ha de tener el valor de f_{min} para calcular el índice de aislamiento acústico es aproximadamente de 166 Hz, en bandas de tercios de octava se podría considerar valores inferiores a 200Hz, en cambio inferiores a 166 Hz podría perderse información.

COLOCACIÓN DEL EQUIPO DE MEDICIÓN:

Se colocará el equipo de medición en base a las siguientes consideraciones:

Las distancias determinadas se miden unas incertidumbres que no sean superiores al 1% de sus valores nominales.

- El altavoz se coloca en la posición de referencia de la fuente para las mediciones de índice de aislamiento acústico (H_s , distancia de referencia del altavoz será 2 m ver figura 18).

En la cara posterior de la barrera acústica se encuentra el micrófono.

El micrófono se coloca sucesivamente en cada uno de los nueve puntos de la rejilla de medición

Cuando el micrófono está en la posición central de la red de medición, el centro acústico de la fuente de sonido y el centro acústico del micrófono se encuentran en la misma línea horizontal.

Una medición de campo libre se toma desplazando el altavoz y el micrófono con el fin de evitar hacer frente a cualquier objeto cercano, incluyendo el suelo.

Las nueve mediciones tomadas además de la medida de campo libre correspondiente se procesan y se promediarán de acuerdo con la fórmula del índice de aislamiento de sonido (SI).

SUPERFICIE DE LA MUESTRA Y LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS

CONDICIÓN DE LA SUPERFICIE DE LA MUESTRA

A menos que la medida tenga como objetivo específico la determinación de la influencia del tiempo u otros factores ambientales en la propagación del sonido, las mediciones se llevarán a cabo sólo cuando la superficie de la muestra esté seca. Si se observa que la superficie de la muestra tiene un significativo número de poros obstruidos, entonces la medición no se realizará hasta que se haya comprobado que los poros estén secos.

La temperatura de la superficie de la muestra debe estar dentro de 0-70 ° C durante la medición.

VIENTO

Velocidad del viento en las posiciones de micrófono no excederá de 5 m / s durante las mediciones.

LA TEMPERATURA DEL AIRE

La temperatura ambiente debe estar dentro de 0 a 40 ° C durante las mediciones. En los cálculos que impliquen conocer el valor de la velocidad del sonido, su valor

depende de la temperatura será tomada, usando el valor real de la temperatura alrededor de la zona de prueba.

Se prosigue clasificando los valores obtenidos en los cálculos realizados con índice de aislamiento acústico en la barrera acústica en estudio, en un solo valor para determinar el aislamiento del ruido aéreo, se denomina índice de evaluación de la absorción acústica DL_{Si} (dB), viene definido por la siguiente expresión:

$$DL_{Si} = -10 \log \left[\frac{\sum_{i=m}^{18} 10^{0.1Li} 10^{-0.1Si}}{\sum_{i=m}^{18} 10^{0.1Li}} \right] \quad (6)$$

Donde:

$m = 4$ (número de los 200 Hz banda de tercio de octava).

Li Niveles relativos de presión sonora ponderados (dB) del espectro de ruido de tráfico normalizado, definido en la norma EN 1793-3 [12], en banda de tercios de octava.

3.DISEÑO EXPERIMENTAL

Expuesto en la parte teórica del presente trabajo, a continuación se aplica del método descrito en el standard británico CEN/TS 1793-5 se producirá a la aplicación del objeto de esta investigación.

3.1 INSTRUMENTACIÓN:

Los elementos empleados para realizar las medidas descritas son:

- Fuente con autoamplificador homologada B&K.
- Micrófonos B&K con una sensibilidad de 18.2mV/Pa.
- Generador de funciones: tarjeta CLIO.
- Ordenador portátil para procesar los datos mediante el programa de cálculo matemático Matlab.

Las dimensiones del altavoz reguladas en la normativa son las siguientes: 0.40m x 0.285m x0.285m (largo x ancho x alto).

Antes de iniciar el desarrollo de la parte experimental, se tuvo en consideración el factor meteorológico y las condiciones de la zona geográfica concreta. Debido a que puede variar los resultados como se ha argumentado anteriormente.

Las condiciones meteorológicas fueron las siguientes: velocidad del viento 2.5m/s, temperatura de 19.8°C y con una superficie terrestre seca.

3.2 APLICACIÓN DE LA NORMATIVA

Las señales MLS se genera a través de una tarjeta de sonido llamada CLIO conectada a al ordenador portátil. Las señales generadas se envían a la fuente para que sean emitidas. Se toman nueve mediciones con una frecuencia de señal MLS de 64 kHz y otras nueve mediciones con una frecuencia de señal de 128 kHz con duración de 20 segundos por medición.

Con estas dos tandas de mediciones lo que se pretende es estudiar la respuesta del aislamiento acústico de la barrera en ambas frecuencias, calculado mediante el índice de aislamiento acústico.

4.RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1 DESCRIPCIÓN DE LAS MEDIDAS

La primera medida será tomar la respuesta al impulso entre el micrófono y el altavoz ambos en posiciones opuestas a la barrera acústica. Esta medida incluye, pues, la onda de sonido transmitida y la onda de sonido difractada sobre la parte superior de la barrera, como se ha comentado. La respuesta al impulso se acotará mediante la aplicación de la ventana temporal Adrienne, lo que permitirá aislar la respuesta al impulso (siendo la componente de interés) a la respuesta del impulso difractada (ver figura 25).



Figura 25: Montaje real de la medida experimental del aislamiento de la barrera acústica.

Cabe recordar que en la normativa como se ha expuesto anteriormente existen nueve posiciones de micrófono, posicionados con una altura $h_s = 2 \text{ m}$ y una separación equidistante entre los puntos de medición formando una cuadrícula 3x3, siendo la distancia igual a: $s = 0.4 \text{ m}$.

Sin olvidar las condiciones geométricas de los factores $d_i(t)$ y $d_k(t)$ (ver figura 26).

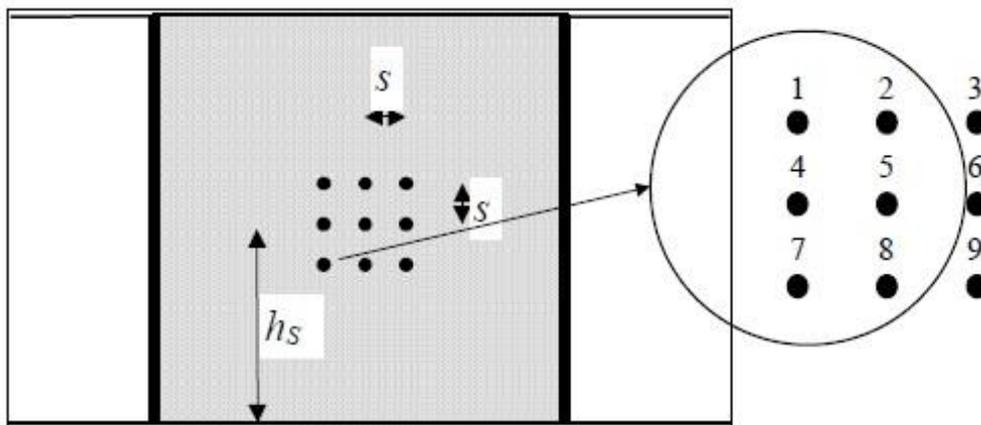


Figura 26: nueve posiciones de micrófono



Figura 27: medición micrófono

Hemos empleado para determinar la respuesta de los micrófonos la pérdida de inserción (IL), se define como la diferencia entre el nivel de sonido sin y con la muestra en el mismo punto. Es decir, da a conocer las pérdidas de potencia de la señal debido a la inserción de un dispositivo en la línea de transmisión, se expresa en decibelios (dB).

Por lo que, las medidas por inserción son una medida de atenuación debida a la inserción de un dispositivo en el camino de la señal, en nuestro caso la barrera.

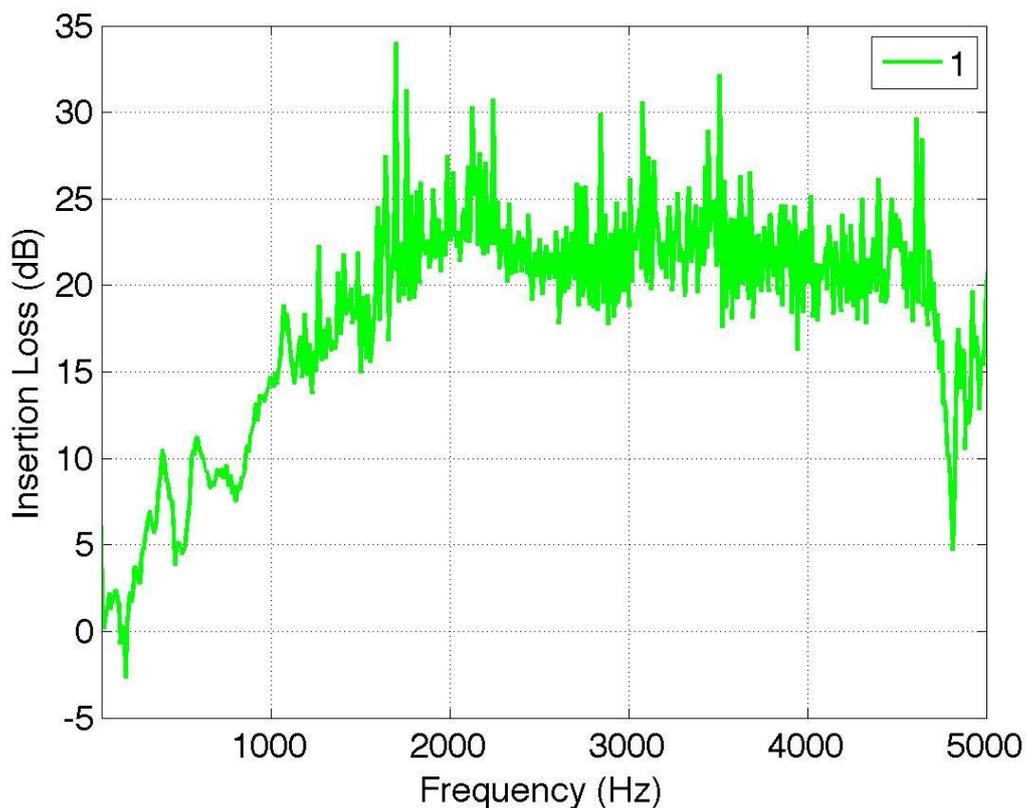
$$IL = 10 \log \frac{P_t}{P_r}$$

P_t (dB) es la potencia transmitida por el altavoz.

P_r (dB) es la potencia que recibe el micrófono.

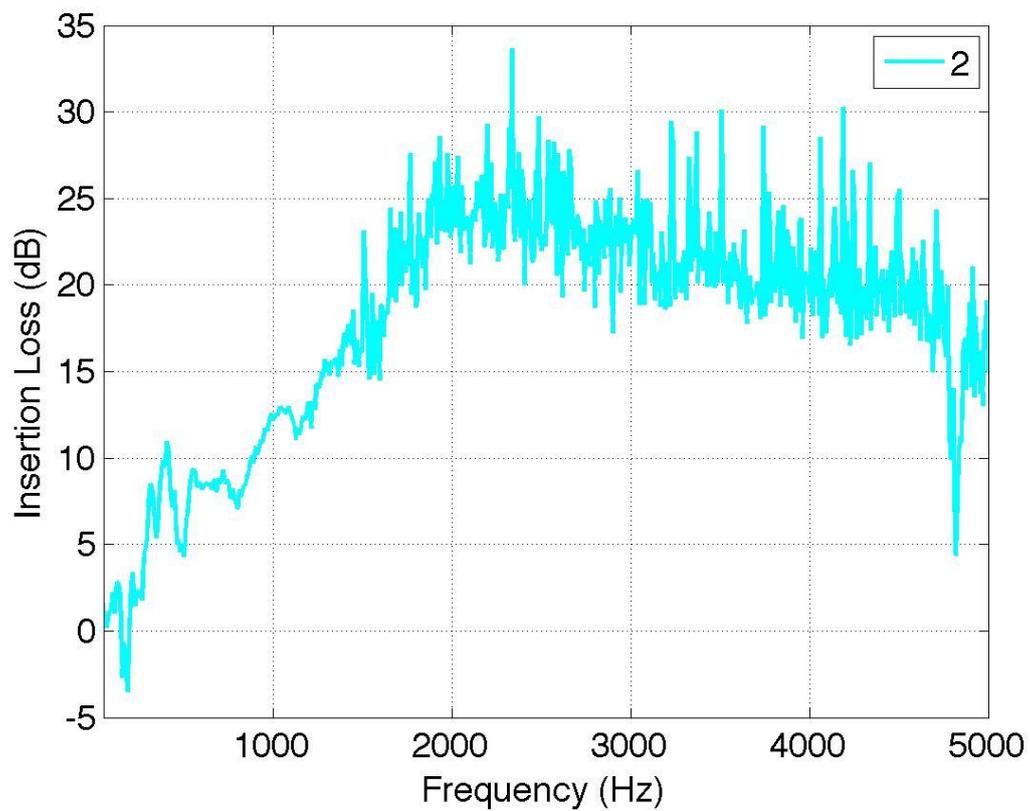
Además, otro de los motivos por los que se ha empleado el cálculo de la pérdida de inserción IL (dB) es porque podemos estudiar si el dispersor tiene la misma respuesta acústica a lo largo de su eje de simetría.

Los resultados de las nueve medidas vienen representados (el cálculo de la pérdida de inserción IL (dB) en un rango de -5 a 35 (dB) respecto a la frecuencia (Hz) en un rango de 100 a 5000 (Hz)), por las siguientes gráficas:



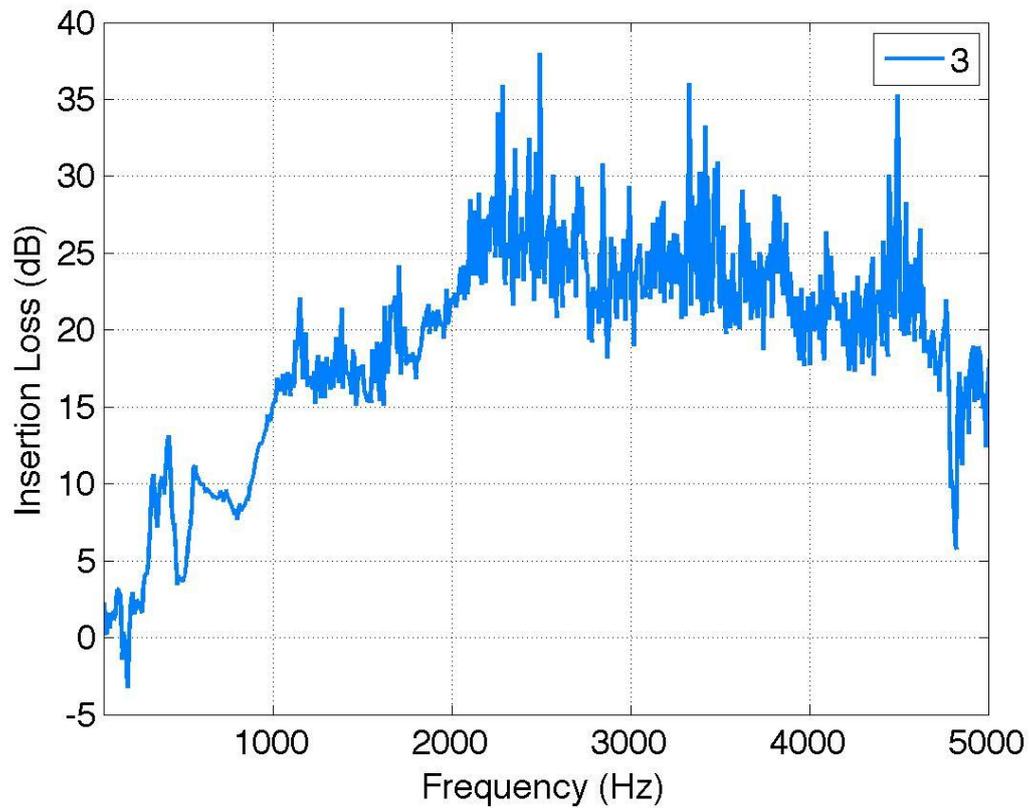
Gráfica 1: IL para la primera posición micrófono.

Observamos que a bajas frecuencias la atenuación toma valores muy bajos, es a partir de 2000 Hz cuando observamos el mayor pico de atenuación. A altas frecuencias vemos que vuelve a aparecer picos decrecientes.



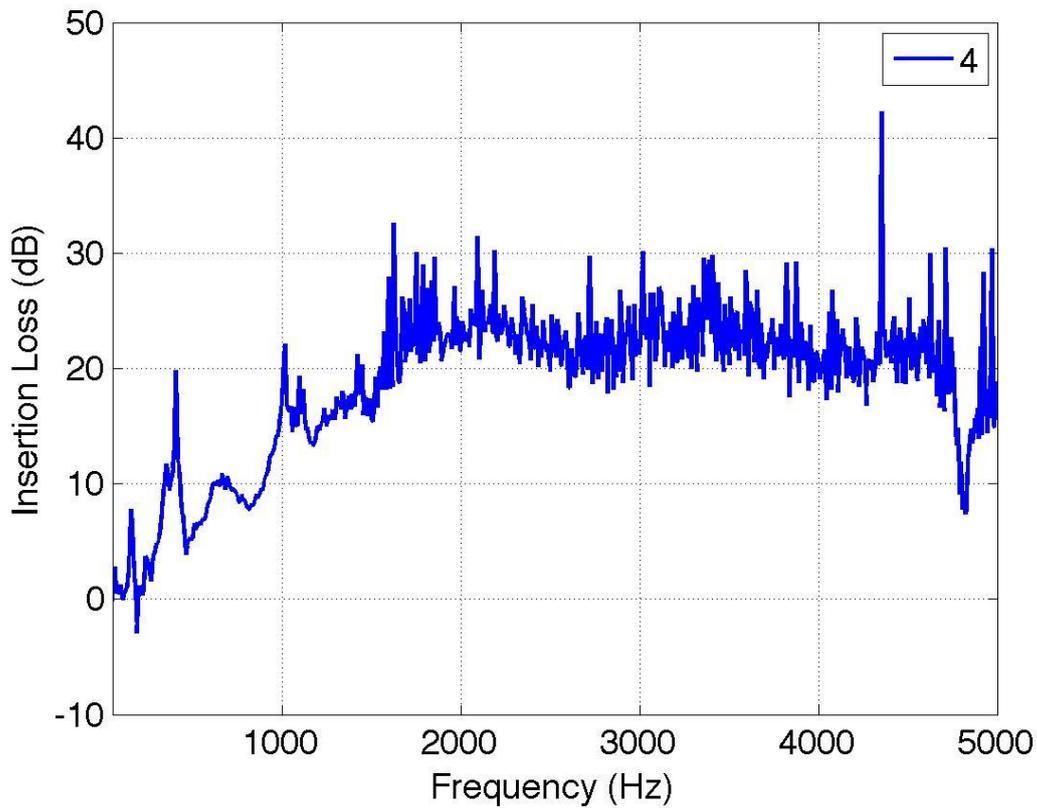
Gráfica 2: *IL* para la segunda posición micrófono.

En la segunda gráfica observamos que a diferencia de la primera gráfica, los picos crecientes los encontramos en frecuencias más altas, alrededor de 2500 Hz, se mantiene en valores de 20 (dB) a 25 (dB) hasta alcanzar una frecuencia de 4200 Hz, donde vuelve a disminuir.



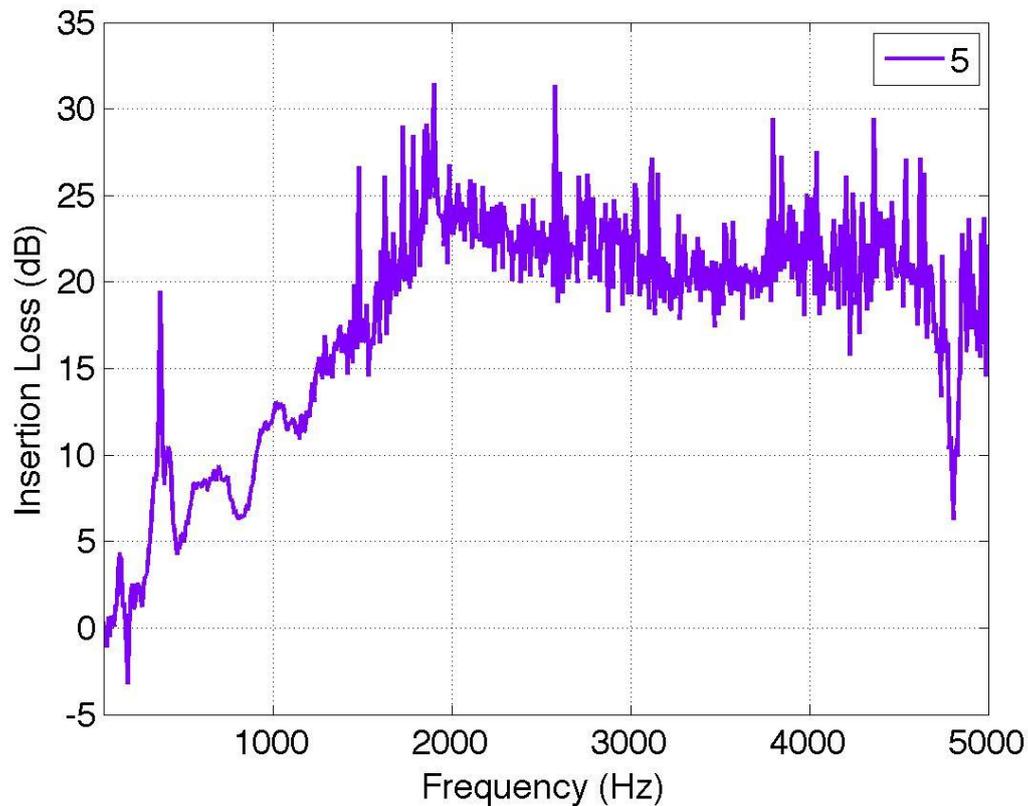
Gráfica 3: *IL* para la tercera posición micrófono.

En la tercera medida observamos que existen tres picos significativos 2500 Hz, 3500 Hz y en 4500 Hz. En frecuencias bajas el valor de la atenuación sigue siendo bajo, pero en comparación con dos primeras medidas aumenta el valor de atenuación a partir de 1000 Hz.



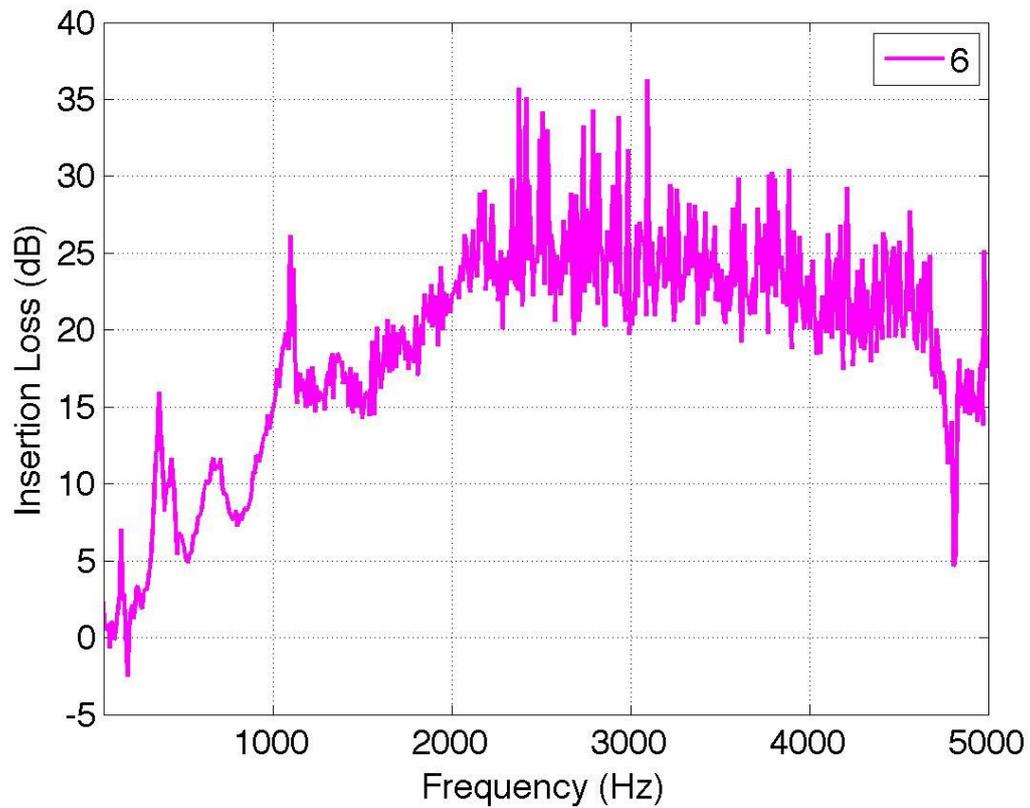
Gráfica 4: *IL* cuarta posición micrófono.

Observamos que la respuesta en la cuarta posición de micrófono es más homogénea, observamos que existe una mayor atenuación a frecuencias bajas y a partir de 1700 Hz los valores de atenuación oscilan entre 20 dB y 30 dB. La cuarta posición corresponde a la parte central de la cuadrícula, se observa una atenuación más homogénea y plana para el rango de frecuencias que estamos evaluando.



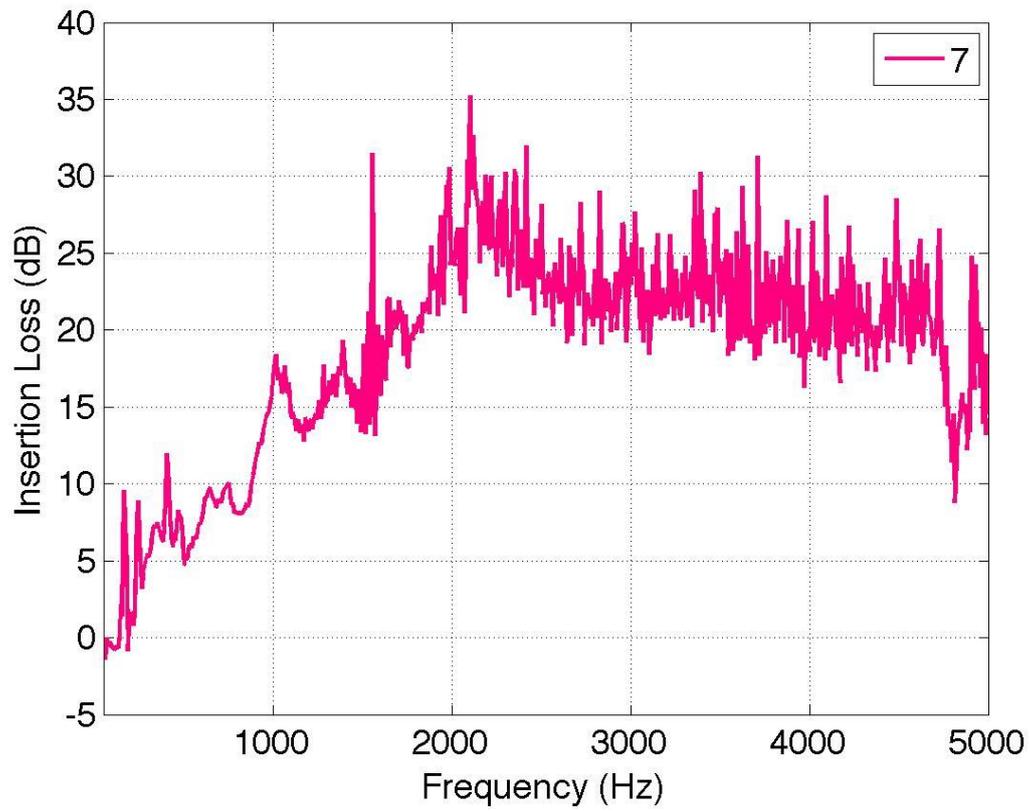
Gráfica 5: IL para la quinta posición micrófono .

En la quinta posición, corresponde a la posición central observamos un aumento de atenuación en frecuencias bajas, cuestión relevante para el comportamiento de la barrera acústica, observamos que conforme va aumentando la frecuencia aumenta la atenuación, dando valores altos también para altas frecuencias, habiendo un decaimiento en 4700 Hz (presente en las anteriores gráficas pero en este caso con valores mayores de IL en rango de frecuencias altas).



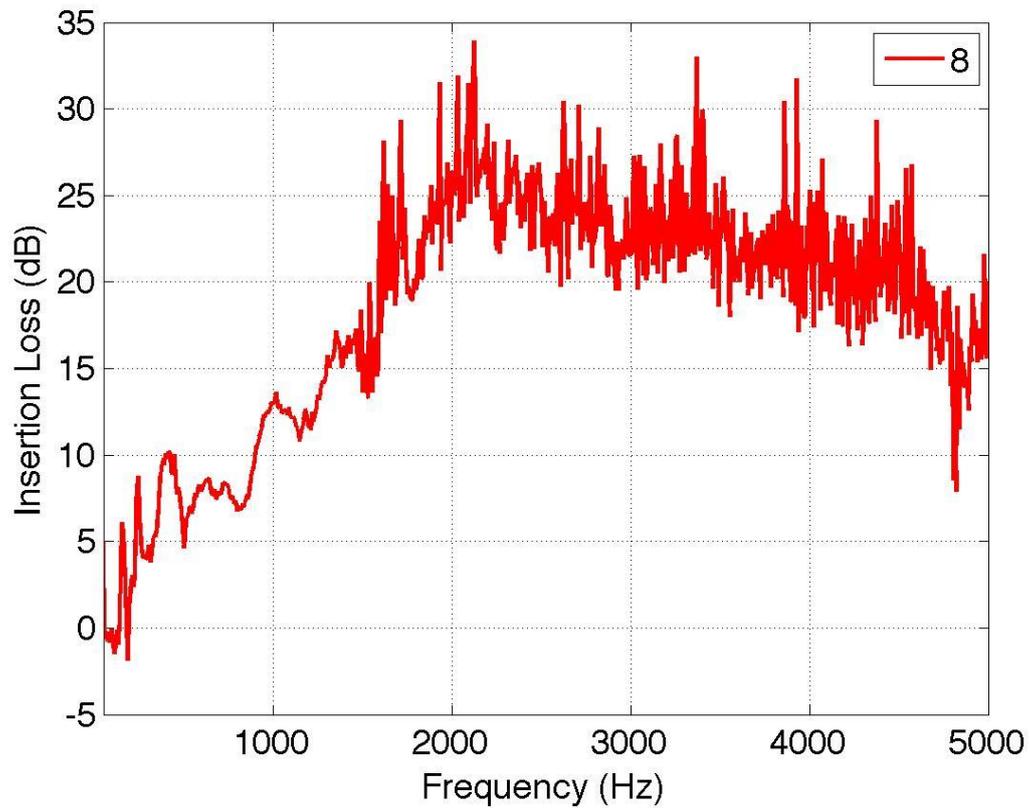
Gráfica 6: *IL* para la posición micrófono 6.

Sigue un patrón similar a la respuesta de la quinta medición, aunque se observan más picos, atenuación más baja a frecuencias bajas y aumenta en zona de frecuencias medio- altas. Aunque en frecuencias altas decae respecto a los resultados de la quinta posición y toma valores similares a las anteriores gráficas.



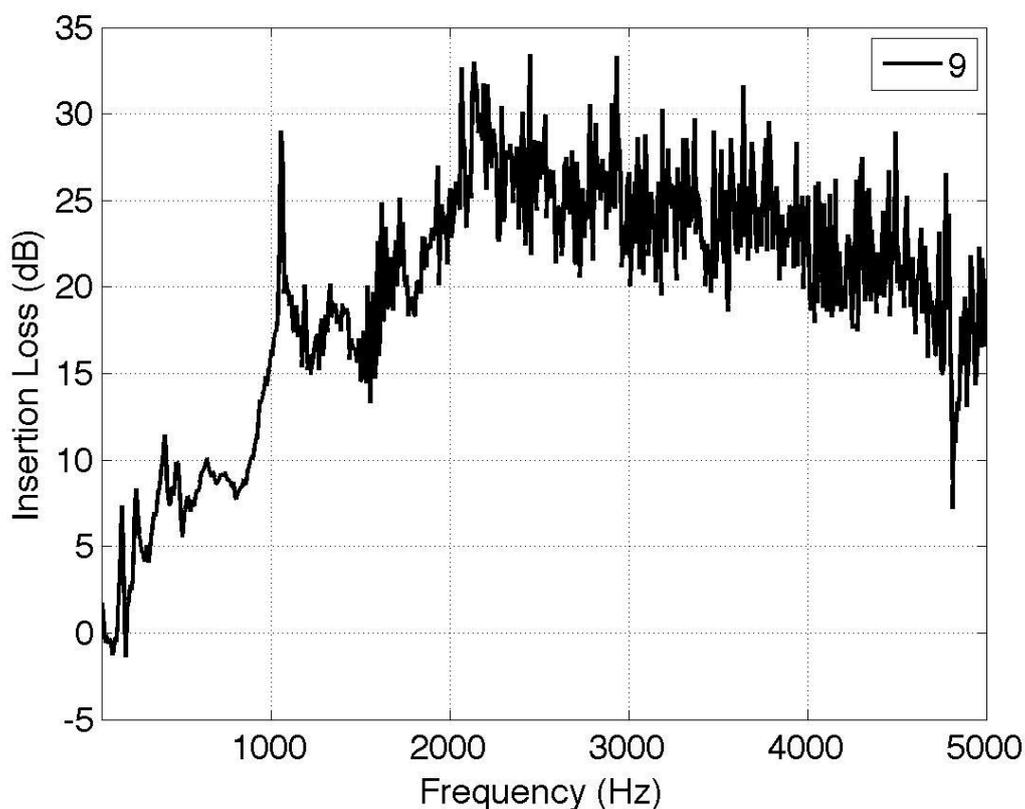
Gráfica 7: *IL* para la séptima posición micrófono.

En la séptima posición el resultado que observamos es atenuación en rangos medios de frecuencia.



Gráfica 8: *IL* para la octava posición micrófono.

En la octava posición observamos los valores más altos de atenuación a media frecuencia llegando a 34 dB, parten en 1700 Hz se mantienen los valores altos de *IL* hasta los 4700 Hz.



Gráfica9: IL para la novena posición micrófono.

Vemos un pico significativo a 1000 Hz con valor de 27 dB, decae y vuelve a aumentar la atenuación a partir de 2200 Hz tomando de nuevo valores máximos cercanos a 34 dB.

En el apartado de descripción de la estructura, se ha detallado las partes por las que está compuesta la barrera en estudio, así como los materiales y medidas. Para evaluar correctamente los resultados expuestos, hay que entrar a valorar qué papel juegan los resonadores, la lana de roca y la estructura periódica.

Por tanto, viendo las respuestas obtenidas del cálculo del IL en rango de frecuencias de 100 Hz a 5000 Hz, hemos observado ciertos picos en frecuencias bajas en distintas posiciones, (destacan en la cuarta posición y en la posición central tomando valores próximos a 20 dB a 400 Hz). Esto es debido a la función de los resonadores internos, podemos observar que existe un aumento del valor de IL en todas las mediciones en 400 Hz aproximadamente, en las siguientes imágenes podemos observar en detalle que a 400 Hz existe un pico en atenuación (ver figura 28):

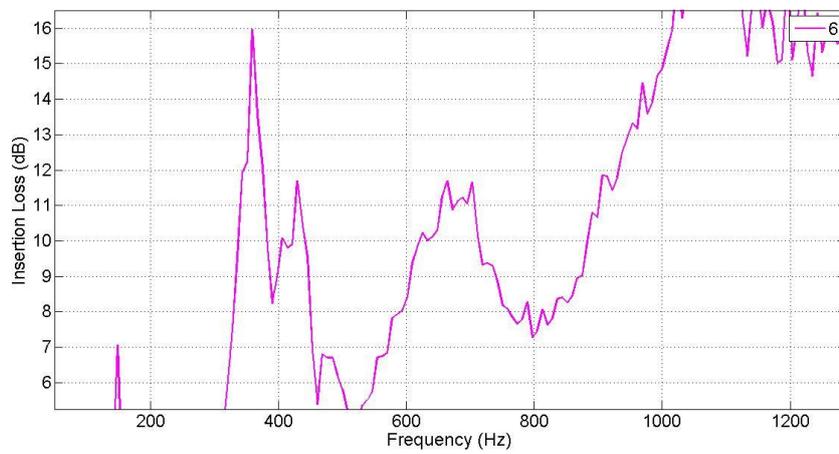
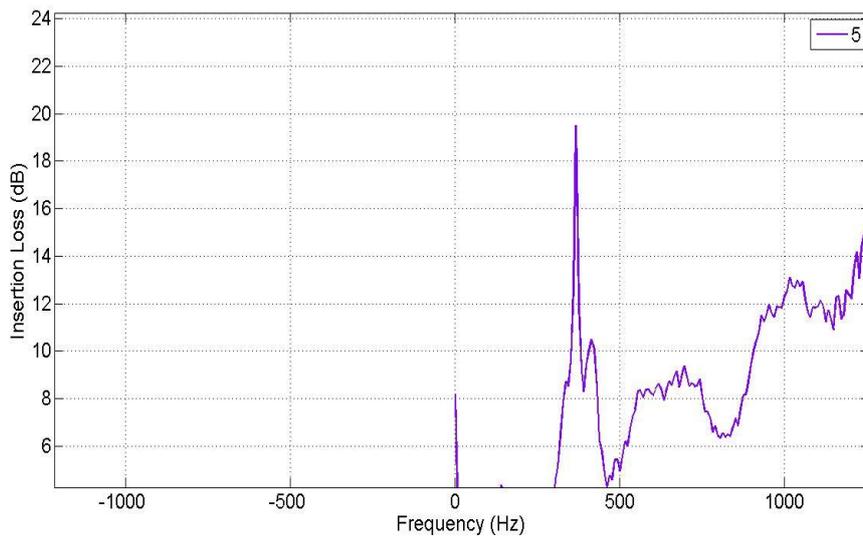
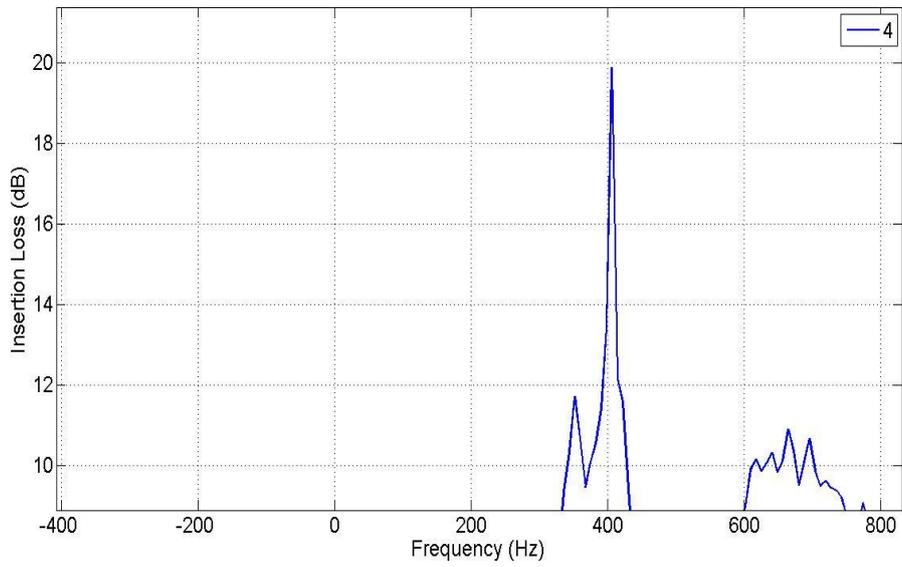
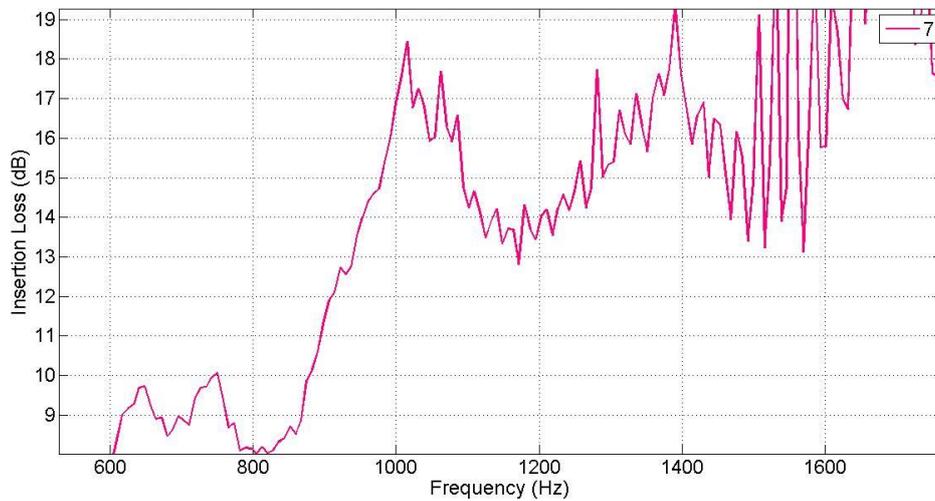
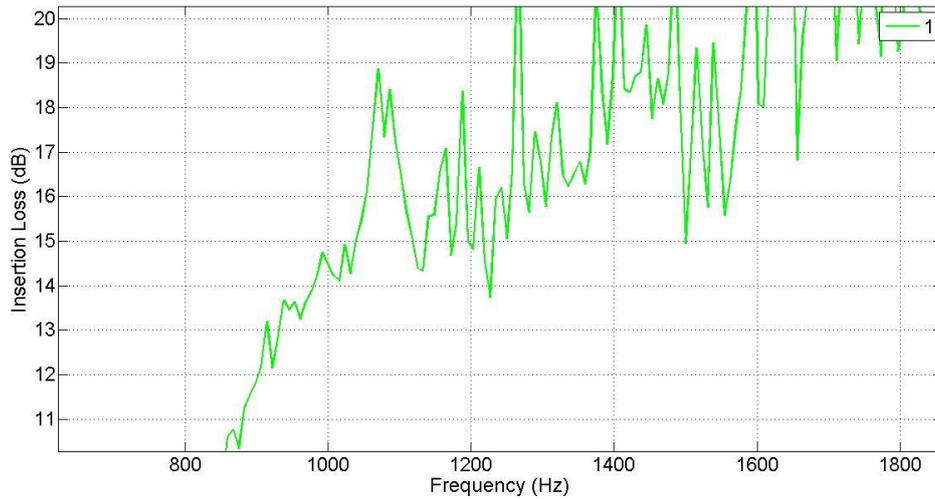


Figura 28: respuesta en detalle a 400 Hz mediciones en tercera, cuarta, quinta y sexta posición.

Las cavidades van recubiertas por una lámina de lana de roca, los materiales porosos funcionan en el rango de frecuencias medias- altas. Observamos un aumento del valor de IL (dB) en 900 Hz. (ver figura 29)



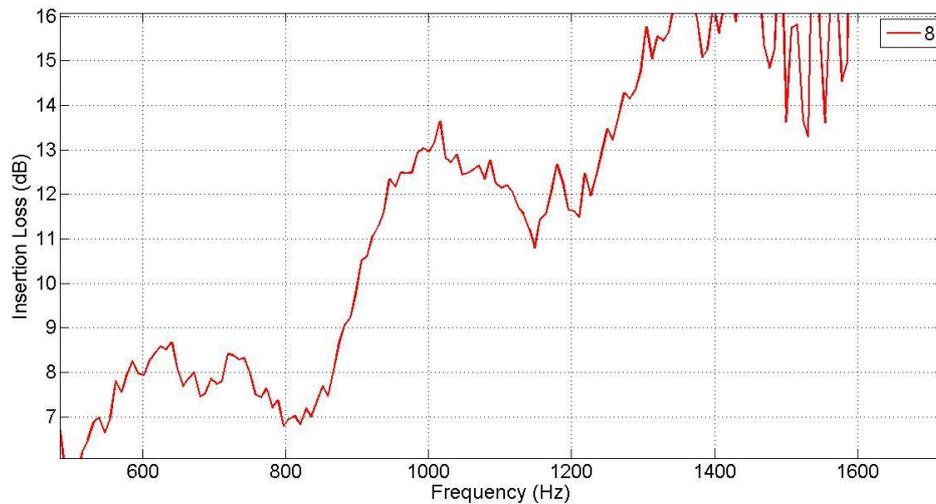


Figura 29: primera, séptima y octava medición en detalle a partir de 900 Hz se observa aumento del valor de atenuación provocado por la lana de roca.

Además de la lana de roca y la cavidad que actúa como resonador, también cabe mencionar la cubierta exterior que cubre el dispersor, como se ha comentado, es una placa perforada de 1 mm de espesor y con perforaciones de 5 mm de diámetro. El papel de la cubierta es proteger la lana de roca a las condiciones ambientales, por lo que, no afecta al comportamiento de la barrera acústica, su única finalidad es proteger el material absorbente.

A continuación se muestra la respuesta de las nueve mediciones en presión sonora (Pa) respecto al tiempo y en nivel de presión sonora (dB) respecto a la frecuencia (Ver figura 30).

Siguiendo la normativa, como se ha expuesto en apartados anteriores, emplazamos la ventana temporal Adrienne en los puntos temporales descritos, que vienen definidos por las características que tiene nuestra barrera (altura, grosor, etc), con el fin de excluir el sonido reflejado en el suelo (para la medición del sonido directo) y el sonido difractado en el borde superior de la barrera (para la medición SI).

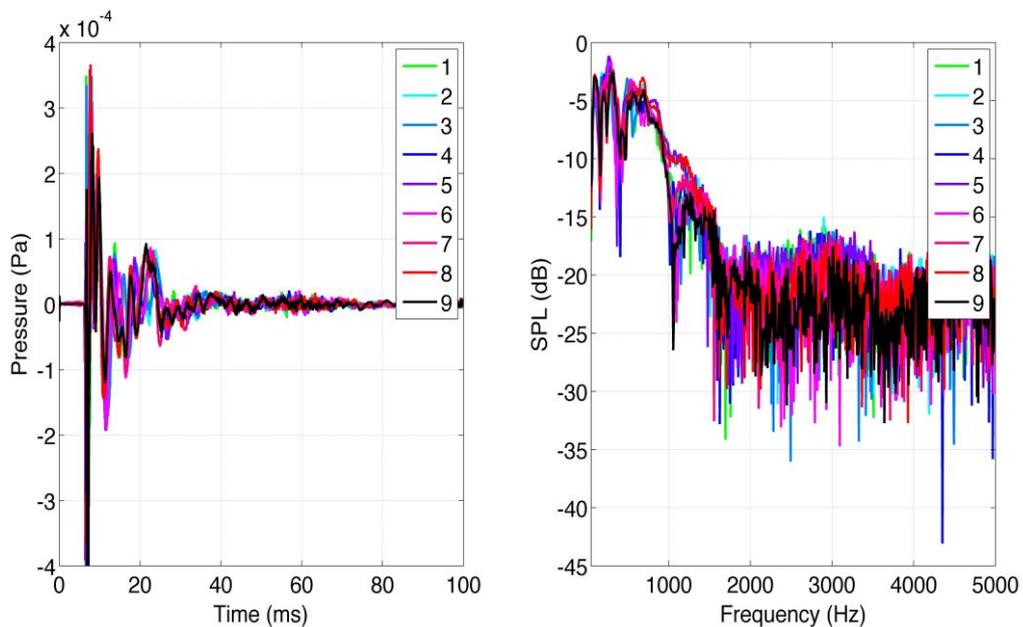


Figura 30: respuesta de las nueve medidas en el dominio temporal y en el dominio frecuencial.

En detalle las nueve medidas en comparación con la figura 31 que representa una señal con la ventana temporal Adrienne.

Emplazando la ventana temporal Adrienne correctamente en las señales indicadas, conseguimos eliminar las primeras reflexiones indeseadas procedentes de otras ubicaciones no correspondientes a nuestro sistema de medición.

Las filtraciones indeseadas que pueden filtrarse por ejemplo en el borde inferior de la barrera, creando fluctuaciones que colocando debidamente la ventana temporal Adrienne en la señal, quedan aisladas, dando por resultado una señal libre de filtraciones.

Cualquier objeto que no componga el sistema de medición será un objeto reflectante, por lo que a la hora que se realizaron las medidas tuvimos en cuenta no tener objetos cercanos que pudieran alterar las condiciones de las mediciones.

Observamos que el nivel de presión sonora toma valores muy bajos, por tanto, damos por hecho que el efecto de atenuación producido por la barrera acústica basada en CS, es notable, dando valores considerables en un amplio rango de frecuencias. Consecuentemente disminuyen las frecuencias bajas entrando valores máximos de SPL = -17dB.

En frecuencias medias encontramos el valor máximo que entramos es de SPL= -37 dB. En frecuencias altas cabe destacar el pico correspondiente a la quinta medición que llega a un valor de SPL=-43 dB. A partir de 1500 Hz se observa una respuesta homogénea del SPL las nueve mediciones, en ciertas frecuencias dando valores máximos de atenuación.

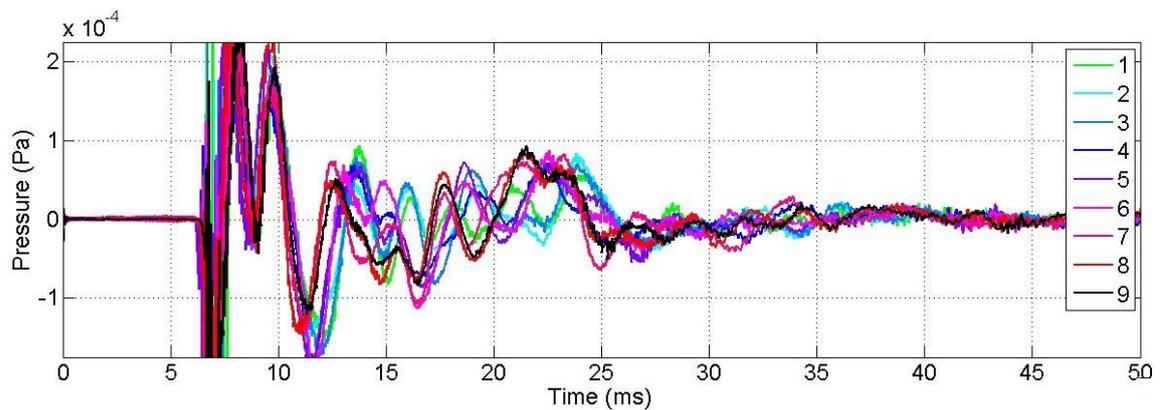
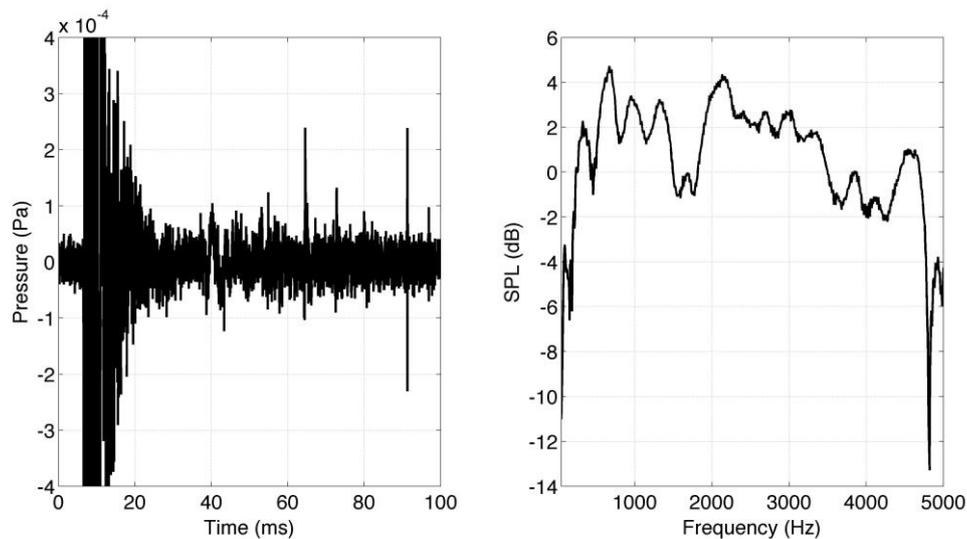


Figura 31: presión sonora respecto al tiempo de las nueve mediciones.

La segunda medida (ver figura 33) corresponderá a la respuesta del sonido directo, se tomó en ausencia de la barrera, es decir, se obtuvo la respuesta que existe entre la señal que emite el altavoz y la señal que recibe el micrófono, evitando cualquier objeto cercano, incluyendo el suelo.



Figura 33: montaje para la obtención de la medida de sonido directo.



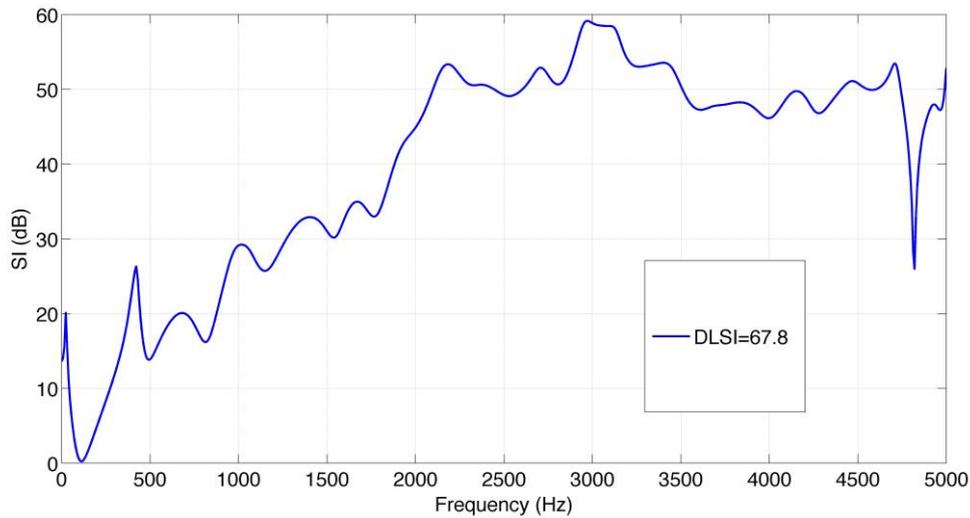
Observamos que los niveles de presión sonora en campo libre distan con diferencia de los resultados con presencia de la barrera. Por lo que, llegamos a la conclusión que el comportamiento de la barrera es deseado además de cubrir con el amplio rango de frecuencias evaluado (100 Hz a 5000 Hz).

Siguiendo el standard británico [3], proseguimos con los resultados del cálculo del índice de aislamiento acústico (SI).

Reiteramos la importancia de las dimensiones de la barrera, el emplazamiento correcto de la ventana temporal Adrienne, para que los cálculos, y en este caso, el del SI sean válidos. Para evitar los solapamientos de la componente transmitida y la difractada.

Observamos que el resultado da valores en el rango de frecuencias 100 Hz a 5000 Hz son positivos. Únicamente en dos puntos existe un decaimiento a baja frecuencia entorno a los 200 Hz y en alta frecuencia entorno a los 4700 Hz. La respuesta global de la barrera acústica basada en CS respecto al aislamiento, es relevante frente a otro tipo de barreras acústicas. En consecuencia, podemos decir que el aislamiento obtenido es óptimo.

Con un valor de $DL_{si} = 67.8 \text{ dB}$. En comparación con otros estudios como por ejemplo llegado a cabo por Greg Watts y Phil Morgan [12], los valores que obtienen aplicando la misma metodología en diversas barreras acústicas (siendo reflectantes, absorbentes y de diversos materiales como: hormigón, madera, etc), obtienen como resultado valores de $DL_{si} = 34.4 \text{ dB}$. Siguiendo el standard británico CEN/TS 1793-5 [10] y por tanto, empleando barreras de las mismas dimensiones que la nuestra, elaborando el mismo proceso de medición.



Con el valor de DL_{Si} si aplicamos normativa EN 1793-1:1997, dependiendo del valor que dé, se clasifica por categoría el comportamiento de absorción que tiene la barrera acústica, en este caso correspondería a la categoría más elevada (A4).

Cabe destacar que este método es novedoso por el hecho de realizar las medidas *in situ*, para cerciorarnos de que los resultados obtenidos son válidos, vamos a comparar los resultados obtenidos con los de laboratorio [12, 13].

Se ha llegado a la conclusión que ambos ensayos muestran un alto grado de correlación cuando las condiciones de las pruebas y el análisis frecuencial correspondiente coinciden en la mayor medida posible.

Las diferencias notables que existen entre evaluar en laboratorio e *in situ* son las siguientes:

- El campo de sonido es difuso en el caso del laboratorio, lo que implica que los ángulos de incidencia de la señal acústica tienen la misma probabilidad. En cambio *in situ*, los ángulos de incidencia están restringidos por la posición de la fuente en sonido directo.
- Las condiciones de los bordes son diferentes en los dos casos. En laboratorio los bordes se sujetan y se sellan mientras que *in situ* el borde superior de la barrera no tiene restricciones.
- También existe diferencias respecto a la temperatura y humedad, debido a que si por ejemplo la temperatura aumenta, reduce el aislamiento acústico.

A continuación se muestra una tabla con los resultados de DL_{SI} calculado en laboratorio y in situ.

Barrier type	Road traffic spectrum			High speed train spectrum		
	DL_R [dB]	DL_{SI} [dB]	DL_{SI} [dB]	DL_R [dB]	DL_{SI} [dB]	DL_{SI} [dB]
		In situ	In situ		In situ	In situ
	Lab.	Elements	Post	Lab.	Elements	Post
Metallic cassettes with rock wool (2000) —Manufacturer A	24	31	32	28	35	35
Metallic cassettes with glass wool (2005)—Site A	25	31	28	30	37	33
Metallic cassettes with glass wool (2000)—Manufacturer B	26	32	33	32	39	38
Metallic cassettes with glass wool (2005)—Site B	26	32	32	32	39	37
Timber/Metal cassettes with glass wool (2005)	25	26	26	30	32	32
Concrete panels with a porous side	45	37	20	48	37	19
Framed acrylic sheets and concrete panels	33	34	31	33	36	32

Tabla 1: diferencias entre los valores de DL_{SI} en un tipo de barrera, emplazamiento (carretera o vía ferroviaria) y medidas realizadas en laboratorio y in situ.

Podemos ver que las diferencias existentes con el valor de DL_{SI} son mínimas. En el caso de laboratorio la medida correspondiente al tráfico rodado en comparación con la medida in situ el valor de DL_{SI} oscila 1 dB.

En el supuesto medir en frente de la barrera la diferencia del valor de DL_{SI} oscila -4 dB.

Por tanto, podemos afirmar que existe concordancia aplicando el método de ensayo en laboratorio e in situ.

5. CONCLUSIONES

El presente trabajo se ha centrado en estudiar las características intrínsecas de la barrera acústica basada en CS, aplicando el método descrito en el Standard británico CEN/TS 1793-5.

Se pretende diferenciar dos aspectos fundamentales: en primer lugar, la barrera a analizar está basada en Cristales de Sonido y, en segundo lugar evaluar el comportamiento de la barrera in situ aplicando el método CEN/TS 1793-5.

Los estudios referentes a los CS son recientes nacen de los estudios de Yablonovitch y Johnson [1]. Los cristales de sonido son elementos periódicos finitos compuestos por dispersores dispuestos en un material homogéneo. Como hemos analizado, los CS contienen propiedades acústicas idóneas para ser aplicados en el campo de la contaminación acústica. Sólo la presencia de las BG no son suficientes para tener un resultado óptimo, por lo que, se elaboraron investigaciones, se añadieron a los dispersores, resonadores y material absorbente. De tal modo, se consigue un aumento cuantitativo de mejora de las funciones de la barrera acústica.

Los factores claves son: la disposición periódica de la barrera acústica, las cavidades con sus diferentes diámetros y el material absorbente. Hace una combinación perfecta para que el funcionamiento de la barrera acústica sea eficiente y eficaz para el lugar donde ha sido colocada.

Para que el resultado sea conforme a las expectativas, la barrera acústica ha de tener unas medidas concretas, sino, los resultados no serán adecuados. En el estudio realizado por Greg Watts y Phil Morgan [12] se da el caso de una barrera acústica con diferentes dimensiones, por lo que, los resultados distan de lo esperando.

El standard británico CEN/TS 1793-5 [3], también especifica cómo se ha de proceder para estudiar la reflexión en la barrera acústica mediante el índice de medidas de reflexión (RI). En nuestro caso, hemos procedido a estudiar el comportamiento del aislamiento de la barrera.

Como se ha expuesto, nuestra barrera acústica en estudio, presenta cilindro que no son rígidos, es decir, presentan absorción y resonancias, con el fin de mejorar el comportamiento frecuencial, ampliando y pudiendo seleccionar el rango de frecuencias de interés a atenuar, así como el comportamiento angular, consiguiendo una disminución de la dependencia de la dirección de incidencia.

Con los resultados obtenidos llegamos a la conclusión que el valor de DL_{si} , determina el aislamiento de la barrera es significativamente superior en comparación con una barrera acústica tradicional. A lo expuesto anteriormente, los elementos que marcan la

diferencia respecto a una barrera acústica clásica, es su distribución periódica finita CS, las cavidades con sus diferentes diámetros que actúan como resonadores y el material absorbente. Las aplicaciones y funciones que tiene esta barrera acústica son las siguientes: puede ser instalada en carreteras, así como en vías ferroviarias. En este trabajo no se ha estudiado, en artículo [13] se llega a la conclusión de que este tipo de barrera acústica disminuye un 50% el efecto del viento que produce los trenes.

Por último, se ha comprobado que las mediciones in situ son válidas, ya que no existe apenas diferencia con las elaboradas en un laboratorio. Por lo que, al estar *in situ*, se puede llegar a evaluar de mejor manera el emplazamiento, facilitar la construcción de la misma, y la elaboración de estudios del comportamiento de la barrera acústica.

AGRADECIMIENTOS:

A mis profesores Vicent Romero García y Joan Martínez Mora por haberme orientado para desarrollar la temática de este trabajo final de carrera, su paciencia y dedicación para el logro del presente estudio.

6. REFERENCIAS

- [1] Toyokatsu Miyashita Sonic crystals and sonic wave-guides (2004).
- [2] V Romero-García, Victor Sánchez-Perez and L-M- García-Raffi (2011). Tunable wideband bandstop acoustic filter based on two dimensional multiphysical phenomena periodic system.
- [3] BS CEN/TS 1793-5:2003 Road traffic noise reducing devices-Test method for determining the acoustic performance- Part 5: Intrinsic characteristics- In situ values of sound reflection and airborne sound insulation.
- [4] EN 1793-2, Road traffic noise reducing devices-Test method for determining the acoustic performance-. Part 2 Intrinsic characteristics of airborne sound insulation. CEN Brussels, 1998.
- [5] ISO 140-3, acoustics - measurements of sound insulation in buildings and of buildings elements - part 3: laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements, 1995.
- [6] introducción a la física del estado sólido.
- [7] V. Romero-García, J.O. Vasseur, L. M. Garcia-Raffi and A. C. Hladky-Hennion. "Theoretical and experimental evidence of level repulsion states and evanescent modes in sonic crystal stubbed waveguides". New J. Physics, 14 023049 (2012)
- [8] EN 1793-3, Road traffic noise reducing devices - Test methods for determining the acoustic performance - Part 3: Normalized traffic noise spectrum, 1997
- [9] ISO 717-1, Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of buildings elements - Part 1: Airborne sound insulation, 1996
- [10] TESIS DOCTORAL (UPV 2010) V. Romero-García, 2010. "On the control of propagating acoustic waves in Sonic crystals: analytical, numerical and optimization techniques".
- [11] Fundamentos de acústica Kinsler.
- [12] Greg Watts y Phil Morgan (2006). Measurement of airborne sound insulation of timber noise barriers: comparison of in situ method CEN/TS 1793-5 with laboratory method EN 1793-2.
- [13] M. Garai and P. Guidorzi. J. Acoust. Soc. Am. 108 (3), 1054, (2000)

[14] Photonic Crystals book John D. Joannoipoulos.